



Ana Sofia da Silveira Pinto Beirão

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação e quantificação da intensidade da agitação marítima em Portugal Continental

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Francisco Eduardo da Ponte Sancho, Investigador
Auxiliar, LNEC

Co-orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Professora Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues
Arguente(s): Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil
Vogal(ais): Prof. Doutor Francisco Ponte Sancho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



Ana Sofia da Silveira Pinto Beirão

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação e quantificação da intensidade da agitação marítima em Portugal Continental

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Francisco Eduardo da Ponte Sancho, Investigador
Auxiliar, LNEC

Co-orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Professora Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues
Arguente(s): Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil
Vogal(ais): Prof. Doutor Francisco Ponte Sancho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

“Copyright” Ana Sofia da Silveira Pinto Beirão, FCT-UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Primeiro de tudo queria agradecer ao Doutor Francisco Sancho pela partilha de sabedoria a paciência e a atenção e à Professora Maria Graça Neves pela oportunidade e voto de confiança em fazer um trabalho de investigação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Em seguida quero agradecer à minha família, principalmente ao meu pai por nunca me deixar desistir dos estudos. Em seguida a mãe, irmã, amiga Margarida e Cristina pela paciência e insistência.

Para terminar, ao meu avô paterno, que poderia estar extremamente orgulhoso por mim, se estivesse vivo.

RESUMO

A orla costeira Portuguesa apresenta uma considerável faixa exposta ao mar. A observação da erosão costeira, que se têm intensificado ao longo dos últimos anos, leva a uma preocupação crescente com a faixa litoral na costa Portuguesa.

A presente dissertação pretende contribuir para o conhecimento necessário para a avaliação do risco de erosão na costa continental portuguesa, através da análise e classificação da intensidade da agitação marítima em duas zonas distintas: a orla costeira de Espinho, na costa oeste e a orla costeira da Ria Formosa, na costa sul.

Assim, desenvolveram-se e testaram-se índices (ou métodos) de avaliação da “intensidade energética” ou “intensidade da agitação marítima”, em situação de temporal, que se aplicaram aos litorais de Espinho e da Ria Formosa, comparando-se os resultados entre si, com o intuito de selecionar as classes de intensidade energética que possam ser mais adequadas à generalidade da costa continental Portuguesa.

Os índices utilizados foram, além da intensidade energética aplicada em Heitor (2013), a intensidade da potência de onda, a intensidade marítima determinada pela quantidade de movimento da onda e a intensidade marítima determinada pela tensão de radiação.

Da aplicação dos diferentes índices aos dados do litoral de Espinho conclui-se que os resultados dos quatro métodos estão muito bem correlacionados, sendo as diferenças muito subtis. Não é assim possível concluir, para já, sobre a vantagem ou maior adequação de um método sobre qualquer um dos outros. No entanto, da aplicação dos diferentes métodos aos dados do litoral da Ria Formosa conclui-se que os resultados dos quatro métodos diferem entre si, verificando-se que o método do fluxo de energia (ou da potência de onda) não é o método mais adequado, com fraca correlação com os outros métodos energéticos, estando os restantes três métodos bem correlacionados.

Palavras-chave: SWAN, Quantidade de movimento, tensão de radiação.

ABSTRACT

The Portuguese coastline presents a considerable length exposed to the sea. The observation of coastal erosion, which has intensified over the past years, leads to a growing concern with the coastline stability of the Portuguese coast.

This dissertation aims to contribute to the knowledge necessary for risk assessment of erosion on the coast, through the classification of maritime agitation at two zones of the continental Portuguese coast, namely, the coastline of Espinho, on the West Coast, and the coastline of the Ria Formosa, on the southern coast.

Thus, indexes (or methods) of "energy intensity" or "wave intensity" were developed and applied to storm conditions at the coastlines of Espinho and Ria Formosa, allowing to compare both results in order to select the most appropriate energy intensity classes that can be generalised to the entire Portuguese coast.

The developed indexes are, in addition to the energetic intensity method applied in Heitor (2013), the wave energy flux (or wave power) intensity, the intensity determined by the wave momentum flux and the intensity determined by the wave radiation stresses.

From the application of the different indexes to the Espinho coast it was concluded that the results from the four methods are very well correlated and very subtle differences were found. Consequently, it is not possible to conclude about the advantage or greater suitability of a method in relation to any of the others. However, the application of these different methods to the Ria Formosa coast allowed to conclude that the results of the four methods differ and the method of the wave energy flux is not appropriate, with low correlation with the other methods, while the other three methods are well correlated.

Keywords: SWAN, momentum flux, radiation stress.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SWAN Simulating Waves Nearshore

SWL Still Water Level

JONSWAP Joint North Sea Wave Project

LISTA DE SÍMBOLOS

a	amplitude de onda
A_c	amplitude da crista da onda
A_s	amplitude da cava da onda
c_g	velocidade de grupo
dt	tempo de duração do temporal (na integração das intensidades energéticas)
E	densidade de energia da onda
F	frequência cíclica
f_p	frequência de pico
f_w	contribuição para a quantidade de movimento devida à sobrelevação
g	aceleração da gravidade
h	profundidade
H	altura de onda
H_{rms}	altura média de onda quadrática
H_s	altura de onda significativa
I_s	intensidade energética num temporal
I_s'	intensidade energética adimensional
I_{sM}	intensidade marítima através da quantidade de movimento num temporal
I_{sM}'	intensidade marítima através da quantidade de movimento adimensional
I_{sPn}	intensidade marítima através do fluxo de energia num temporal
I_{sPn}'	intensidade marítima através do fluxo de energia adimensional
I_{sSn}	intensidade marítima através da tensão de radiação num temporal
I_{sSn}'	intensidade marítima através da tensão de radiação adimensional
k	número de onda
L	comprimento de onda
m_n	momento de ordem n do espectro
M_f	quantidade de movimento
P	potência de onda
S_{xx}	tensão de radiação
T	período da onda
T_p	período de pico
z	altura de um ponto da superfície do mar a partir do nível médio do mar em repouso
ω	frequência angular
β	rumo
γ	ângulo de inclinação da costa
S_γ	espectro de variância da agitação marítima

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	2
1.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONCEITO DE ONDA E AGITAÇÃO MARÍTIMA	3
1.2.2. CONCEITOS DERIVADOS DA TEORIA LINEAR DE ONDA	7
1.2.3. DEFINIÇÃO DE TEMPORAL	9
1.3. OBJETIVOS	10
2. METODOLOGIA.....	11
2.1. CATEGORIZAÇÃO DAS TEMPESTADES	11
2.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DA INTENSIDADE MARÍTIMA.....	11
2.2.1. INTENSIDADE ENERGÉTICA.....	11
2.2.2. POTÊNCIA DA ONDA	12
2.2.3. QUANTIDADE DE MOVIMENTO DA ONDA	14
2.2.4. TENSÃO DE RADIAÇÃO.....	16
2.3. MODELO NUMÉRICO SWAN	16
2.4. PROGRAMA IS_STORM	18
3. CASOS DE ESTUDO	21
3.1. COSTA LITORAL DE ESPINHO	21
3.1.1. RESULTADOS DE INTENSIDADE ENERGÉTICA	22
3.2. LITORAL DA RIA FORMOSA.....	28
3.2.1. DADOS DE BASE, BATIMETRIA E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	31
3.2.2. RESULTADOS DOS PARÂMETROS DA AGITAÇÃO MARÍTIMA SOB TEMPORAL.....	35
3.2.3. RESULTADOS DA INTENSIDADE ENERGÉTICA	38
3.2.4. COMPARAÇÃO DOS VÁRIOS ÍNDICES	46
3.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	50
4. CONCLUSÕES	55
BIBLIOGRAFIA.....	57
ANEXO I.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação das duas zonas em Estudo (Fonte: Google Maps)	2
Figura 1.2 – Exemplo de vaga (Fonte: MetService Blog, 2015).....	3
Figura 1.3 – Parâmetros básicos de uma onda de superfície (Fonte: Silva, 2009).....	4
Figura 1.4 – Representação gráfica de um Espetro de energia (Fonte: Liu and Frigard 2001)	5
Figura 2.1 – Representação dos ângulos β e γ para o Caso de Espinho (Fonte: Google Maps)	13
Figura 2.2 – Ilustração dos pontos inicial e final no Caso Espinho (Fonte: Google Maps).....	13
Figura 2.3 – Convenção de sinais para o ângulo γ	14
Figura 2.4 – Convenção de coordenadas Náuticas	17
Figura 3.1 – Ilustração da malha de simulação do Caso de Espinho (Fonte: Heitor, 2013).....	21
Figura 3.2 – Linha da batimétrica dos 15 metros ao longo do litoral de Espinho e localizações dos pontos extremos e intermédio (Fonte: Heitor, 2013)	23
Figura 3.3 – Gráfico de comparação entre a intensidade energética e a intensidade de potência de onda.	24
Figura 3.4 – Gráfico de comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela tensão de radiação.....	25
Figura 3.5 – Gráfico de comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela quantidade de movimento	25
Figura 3.6 – Gráfico de comparação entre a intensidade pela potência de energia e a intensidade pela tensão de radiação.	26
Figura 3.7 – Gráfico de comparação entre a intensidade pela potência de energia e a intensidade pela quantidade de movimento	26
Figura 3.8 – Gráfico de comparação a intensidade pela tensão de radiação e a intensidade pela quantidade de movimento.	27
Figura 3.9 – Série de intensidades energéticas adimensionais, parametrizadas pelos quatro métodos, para os 56 anos do caso de Espinho (localização 13)	27
Figura 3.10 – Ilustração da Ria Formosa, em Faro (Fonte: www.cm-faro.pt).....	28
Figura 3.11 – Apresentação do sistema ilhas-barreira de Ria Formosa (Fonte: Alveirinho Dias, 1988)	29
Figura 3.12 – Distribuição de frequência de H_{m0} (Costa <i>et al.</i> , 2011)	30
Figura 3.13 – Distribuição de frequência relativa do período (Costa <i>et al.</i> , 2011)	30
Figura 3.14 – Distribuição da frequência relativa da direção de onda (Costa <i>et al.</i> , 2011)	30
Figura 3.15 – Distribuição conjunta entre altura máxima e PCA(Costa <i>et al.</i> 2001).....	31
Figura 3.16 – Ilustração e dimensões da malha batimétrica	31
Figura 3.17 – Ilustração das fronteiras do domínio de cálculo (Fonte: Google Maps)	33
Figura 3.18 – Esquema de localização dos dados de saída da malha do Caso de Estudo Algarvio ..	34
Figura 3.19 – Ilustração da Intensidade média ao longo da costa Algarvia.....	38
Figura 3.20 – Intensidade energética por localização	39
Figura 3.21 – Período de pico máximo para cada localização.....	39
Figura 3.22 – Valores de H_{s_max} e H_{s_med} por localização	40
Figura 3.23 – Direção média do total de eventos de temporal em relação à localização.....	41
Figura 3.24 – Número de temporais/ano, para cada localização	42

Figura 3.25 – Classes de temporal em função da localização	43
Figura 3.26 – Altura de significativa máxima .vs. duração de temporal, para cada categoria de temporal (linhas a cheio)	44
Figura 3.27 – Intensidade energética .vs. altura significativa de onda	45
Figura 3.28 – Duração de tempestade em função da altura de onda significativa	45
Figura 3.29 – Intensidade Energética versus duração de temporal.....	46
Figura 3.30 – Comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela potência da onda ...	47
Figura 3.31 – Comparação entre intensidade energética e a intensidade pela tensão de radiação ...	47
Figura 3.32 – Comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela quantidade de movimento.....	48
Figura 3.33 – Comparação entre a intensidade pela potência de onda e a intensidade pela tensão de radiação.....	48
Figura 3.34 – Comparação entre a intensidade pela potência de onda e a intensidade pela quantidade de movimento.....	49
Figura 3.35 – Comparação entre a intensidade pela tensão de radiação e a intensidade pela quantidade de movimento.....	49
Figura 3.36 – Métodos de intensidades energéticas adimensionalizadas para os 55 anos	50
Figura 3.37 – Comparação das intensidades energéticas médias para os casos de Estudo de Espinho e Algarve	51
Figura 3.38 – Comparação de valores estatísticos da intensidade energética para os dois casos de estudo.....	52
Figura 3.39 – Comparação de valores estatísticos da intensidade pela tensão de radiação para os dois casos de estudo	52
Figura 3.40 – Comparação de valores estatísticos da intensidade pela potência de onda para os dois casos de estudo	53
Figura 3.41 – Comparação de valores estatísticos da intensidade pela quantidade de movimento para os dois casos de estudo.....	53
Figura I.1 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 1	59
Figura I.2 – Apresentação do período de pico para a localização 1	59
Figura I.3 – Apresentação da direção média para a localização 1	59
Figura I.4 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 6	60
Figura I.5 – Apresentação do período de pico para a localização 6	60
Figura I.6 – Apresentação da direção média para a localização 6	60
Figura I.7 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 15	61
Figura I.8 – Apresentação do período de pico para a localização 15	61
Figura I.9 – Apresentação da direção média para a localização 15	61
Figura I.10 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 21	62
Figura I.11 – Apresentação do período de pico para a localização 21	62
Figura I.12 – Apresentação da direção média para a localização 21	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorização de temporais (Mendonza e Jimenez, 2011)	11
Tabela 3.1 – Características da malha do caso de estudo de Espinho (Fonte: Heitor, 2013)	22
Tabela 3.2 – Representação de valores limite de Intensidades Energeticas.	23
Tabela 3.3 – Características gerais da malha.....	32
Tabela 3.4 – Representatividade dos dados para a costa Algarvia.....	34
Tabela 3.5 – Coordenadas dos pontos da malha batimétrica.....	35
Tabela 3.6 – Apresentação de valores mínimos para as quatro localizações.....	36
Tabela 3.7 – Apresentação das classes de temporal, das intensidades médias e do número de temporais/ano, para cada localização	42
Tabela 3.8 – Categorização de temporais através da intensidade pela tensão de radiação	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

Durante várias décadas, a costa Portuguesa representou uma das principais fontes de receita para o País, com um rico acervo patrimonial e histórico. Teve também um papel fundamental no apogeu marítimo dos Descobrimentos nos séculos XV e XVI.

Ao longo dos tempos, o litoral Português tem contribuído para o desenvolvimento económico do País, servindo como ponto de ligação entre continentes através dos transportes marítimos, tendo, por exemplo a costa Alentejana uma das maiores infraestruturas portuárias do País – o Porto de Sines.

Atendendo à importância e à extensão da zona costeira, de cerca de 863 km, a preservação e conservação da costa tem sido objeto de estudos, especialmente devido à intensificação, ao longo dos últimos anos, da erosão costeira devido à ocorrência de temporais marítimos (Vieira, 2014).

A este problema acresce ainda a previsão da subida do nível do mar até um metro durante o próximo século, segundo projeções apresentadas pelo Painel Governamental sobre Alterações Climáticas (Vieira, 2014), o que poderá resultar no recuo de centenas de metros na linha de costa.

Em todo o país, as zonas litorais têm apresentado condições favoráveis à intensificação da ocupação territorial e, consequente, ao desenvolvimento da atividade humana relativamente à exploração de recursos marítimos (Castro, 2008).

Para contribuir para o conhecimento necessário para a avaliação do risco de erosão na costa continental portuguesa, pretende-se nesta dissertação, em continuidade ao trabalho desenvolvido por Heitor (2013) e Sancho et al. (2013), classificar a agitação marítima em diferentes zonas da costa continental portuguesa. Em particular, aqueles autores avaliaram a energia da agitação marítima para a orla costeira de Espinho (assinalado como “1” na Figura 1.2), conhecida por elevados problemas de erosão e muito intensa agitação marítima.

A costa Algarvia, com uma linha de costa orientada para Sul, é abrigada dos ventos predominantes de Noroeste, provenientes do Atlântico, ao contrário do que acontece com o Litoral de Espinho e, genericamente, com toda a costa oeste.

O presente estudo irá então incidir também sobre uma zona de fraca agitação marítima média, de forma a completar os anteriores e permitir obter, aproximadamente a gama de intensidades energéticas no continente Português. Será assim estudada, adicionalmente à zona de Espinho, uma faixa da costa Algarvia, mais especificamente na zona do Parque Natural de Ria Formosa, localizada no distrito de Faro, sendo para este caso (zona 2 na Figura 1.2).



Figura 1.1 – Representação das duas zonas em Estudo (Fonte: Google Maps)

1.2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Neste subcapítulo faz-se uma síntese de conceitos que serão utilizados nesta dissertação.

Na primeira parte são abordados conceitos gerais de como se caracteriza a agitação marítima começando por definir o movimento de uma onda sinusoidal para a partir daí se poder abordar alguns termos que são geralmente utilizados para caracterizar o clima marítimo.

Na segunda parte é definido o temporal e quais os critérios utilizados nesta dissertação.

1.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONCEITO DE ONDA E AGITAÇÃO MARÍTIMA

Entre vários fenômenos (meteorológicos, gravitacionais ou intermoleculares) que levam a vários tipos de movimento da superfície do mar, as ondas geradas pelo vento são as mais relevantes quando se trata da ação do mar em zonas costeiras.

A agitação marítima é um processo aleatório, que depende em grande parte, da sua geração. O conceito de fetch define a área marítima onde se faz sentir o efeito do vento e por conseguinte, quanto maior essa área maior será a energia transmitida para a superfície do mar.

No caso de uma onda real, quando a superfície do mar é sujeita à ação do vento, a sua configuração tende a ser confusa: as ondas movem-se de uma forma desordenada e sem direção definida. É observada uma ampla variedade de alturas de onda, de direções e de frequências. Uma onda com essa configuração desordenada e localizada próximo da sua zona de geração é denominada de vaga (Figura 1.3); quando apresenta uma forma regular e está longe do seu local de geração é denominada de ondulação - fenómeno também denominado por swell.

O estado do mar pode ainda apresentar-se sob uma destas formas ou como a combinação das duas.



Figura 1.2 – Exemplo de vaga (Fonte: MetService Blog, 2015)

Para uma onda sinusoidal o ponto mais elevado da onda é denominado de crista (A_s) e o ponto mais baixo, cava (A_c); a distância entre estes dois pontos é definida como altura de onda (H) e a amplitude de onda (a) é definida como a metade do valor da altura. A distância horizontal entre dois pontos homólogos sucessivos de uma onda (por exemplo, entre duas cristas) é definida como comprimento de onda (L) e o tempo entre dois pontos homólogos sucessivos de uma onda, por exemplo, duas cristas ou cavas sucessivas, é definido como o período (T), Figura 1.4.

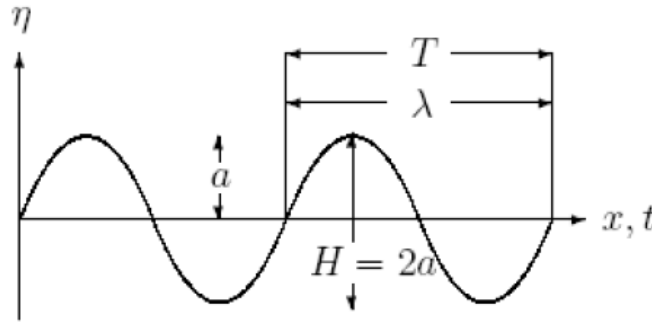


Figura 1.3 – Parâmetros básicos de uma onda de superfície (Fonte: Silva, 2009)

O movimento oscilatório da onda dá-se tendo como referencial o nível médio do mar em repouso (SWL).

Com base nos conceitos básicos do parágrafo anterior, são definidos outros parâmetros, tais como a velocidade de onda que é determinada pela razão entre o comprimento de onda e o período ($c=L/T$); o número de onda (k), que é dado por $k=2\pi/L$; a frequência angular, determinada pela razão $\omega=2\pi/T$ (ou, caso se queria apresentar em Hertz, a frequência cíclica é dada pela expressão $f=1/T$); e a profundidade relativa, que é definida pela razão H/h , sendo h a profundidade local sob uma onda (distância entre o fundo do mar e a superfície livre média).

Após as definições básicas de uma onda de superfície, podem-se definir diferentes zonas de profundidade tendo em consideração a relação deste com o comprimento de onda:

- Admite-se que estamos em grandes profundidades quando h excede o valor $L/2$; neste caso a velocidade da onda depende somente de T (ou do comprimento de onda, L) e diz-se que a onda é dispersiva.
- Admite-se que se está em pequenas profundidades quando h não excede $L/20$; neste caso a velocidade depende apenas da profundidade, h e a onda diz-se não dispersiva.
- Admite-se que se está em profundidades intermédias quando h é superior a $L/20$ e inferior a $L/2$; neste caso, a velocidade depende de ambas as variáveis, T e h .

A relação entre o comprimento de onda, o período e a profundidade é feita com base na equação de dispersão da onda, (1.1) e os conceitos velocidade de onda:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (1.1)$$

Considerando as relações do comprimento de onda e da frequência angular é obtida a seguinte expressão para a velocidade:

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (1.2)$$

Através das equações (1.1) e (1.2) é possível chegar à expressão:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (1.3)$$

Para pequenas profundidades, a função $\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$ tende para $\frac{2\pi h}{L}$. Para grandes profundidades a função $\tanh(kh)$ tende para o valor unitário, tendo uma assíntota nessa ordenada. Obtêm-se assim as expressões:

$$c = \sqrt{gh} \quad , \text{ para } h < L/20 \quad (1.4)$$

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad , \text{ para } h > L/2 \quad (1.5)$$

Sendo assim, as características da propagação diferem consoante a profundidade do meio e afetam o modo como se pode caracterizar algebricamente o movimento da onda.

Uma vez assumida a aleatoriedade do estado do mar, é necessário representar a agitação marítima através de parâmetros estatísticos, por forma a descrever a superfície do mar de uma forma determinística.

Para representar a superfície do mar, é usual recorrer-se então à análise espectral. Esta análise pode ser feita num espaço de tempo ou frequência, do qual é mais usual adotar-se a segunda opção.

A análise espectral procura descrever a distribuição da energia da onda por frequências discretas, através do espectro de energia. Uma vez que uma onda irregular é composta por inúmeras frequências, as mesmas são ajustadas em intervalos de frequência, também denominadas de bandas, Δf . O espectro de energia de onda é então traduzido pela função resultante do valor da energia, S_η associado a cada frequência, f , Figura 1.4, e é determinado por:

$$S_\eta = \frac{1/2 \rho g a^2}{\Delta f} \quad (1.6)$$

sendo g a aceleração da gravidade, ρ a massa específica da água e a a amplitude de onda.

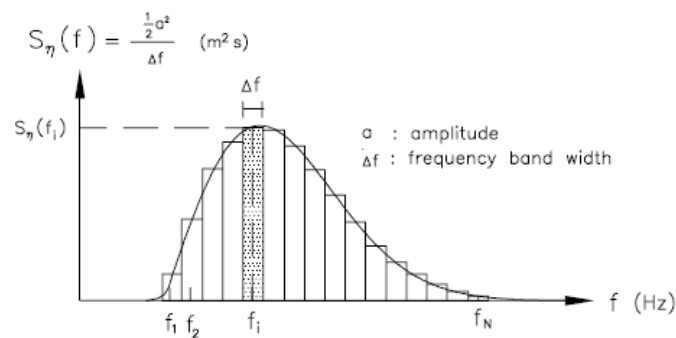


Figura 1.4 – Representação gráfica de um Espectro de energia (Fonte: Liu and Frigard 2001)

A partir do espectro de onda é possível fazer a estimativa de parâmetros estatísticos que definem o estado do mar, como o período de pico, T_p :

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (1.7)$$

sendo f_p a frequência de pico (isto é, a frequência de maior energia do espetro), ou a altura significativa de onda¹, H_s . O período de pico permite caracterizar o período associado ao sistema de ondas predominante.

Definido o momento espectral de ordem n , m_n , por:

$$m_n = \int_0^\infty f_n S_\eta(f) df \quad (1.8)$$

resulta que diversos parâmetros surgem através do cálculo deste momento, tal como a altura de onda significativa, H_s , dada por:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (1.9)$$

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (1.10)$$

A partir do espetro pode ainda ser definido o parâmetro largura de banda espectral, ϵ , que nos dá a informação da dispersão da energia por frequência.

A partir das análises de séries temporais de registos de ondas, foram desenvolvidos alguns espectros teóricos, no qual o mais relevante para esta dissertação é o espetro de *Jonswap*, uma vez que é o espetro utilizado pelo modelo *SWAN*.

A origem deste espetro partiu de um estudo realizado por várias entidades no norte da Europa, com o objetivo de caracterizar o crescimento das ondas sob condições limitadas de *fetch* e para águas pouco profundas, sendo o resultado dos espectros de onda registados no mar do Norte.

Após a análise de um grande número de espectros, foi obtido o seguinte resultado para o espetro teórico de energia de onda:

$$S_\omega = \frac{ag^2}{\omega^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \times \gamma \exp \left[\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega_0^2} \right] \quad (1.11)$$

¹ Note-se que também se define a “altura significativa de onda” pelo método direto de análise no tempo do registo da elevação da superfície livre, nomeadamente, determinando o conjunto de alturas de ondas individuais de determinada série e definindo H_s como a “altura média do terço das ondas mais altas” desse registo.

sendo γ o parâmetro de pico e σ o parâmetro de forma. O espectro *Jonswap* é essencialmente caracterizado por estes dois parâmetros.

Para caracterizar o estado do mar real, é de grande importância a observação da distribuição dos parâmetros característicos da agitação ao longo do ano, de forma a se obter uma estimativa dos seus valores médios ou extremos resultantes de fenómenos meteorológicos que ocorrem ao largo e consequentemente atingem o litoral. Entre os vários parâmetros característicos, os mais utilizados são o período de pico, a direção de ondulação e a altura significativa de onda.

Em relação ao clima marítimo, normalmente distinguem-se alturas do ano em função dos valores destes parâmetros e em função da relevância dos dados que se podem assumir como temporal: o clima de Inverno marítimo, que é definido entre os meses de Outubro e Março (inclusive) e o clima de Verão marítimo para os restantes meses.

1.2.2. CONCEITOS DERIVADOS DA TEORIA LINEAR DE ONDA

Esta secção tem por objetivo a descrição das bases teóricas dos métodos de Intensidade Energética utilizados nesta dissertação.

Assim apresenta-se o conceito de alguns fenómenos físicos de interesse e em seguida faz-se uma breve introdução teórica do método utilizado.

De acordo com a teoria linear, na crista da onda a velocidade vertical é nula e a velocidade horizontal é máxima. Para o nível médio do mar, os valores das duas componentes de velocidade não são nulos (Huges, 2004), sendo que as velocidades horizontais e verticais, assim como a pressão dinâmica, são função da profundidade. Através da teoria linear, a expressão da pressão dinâmica é dada por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$p_d(z) = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \eta \quad (1.12)$$

sendo ρ a massa específica, g a aceleração gravítica, k o número de onda, h a profundidade e z a ordenada de um ponto, tendo como origem o nível médio da água em repouso – SWL e na elevação da superfície instantânea.

Semelhantemente, a velocidade horizontal de uma partícula do fluído associada ao movimento da onda é dada por:

$$u(z) = \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \eta \quad (1.13)$$

A energia total numa onda é a soma da energia cinética com a energia potencial. Assim, a energia total das ondas por unidade de superfície, E , também denominada por densidade de energia, é dada por:

$$E = \frac{\rho g H_{rms}^2}{8} \quad (1.14)$$

em que H_{rms} representa a altura de onda média quadrática (que pode ser relacionada com a altura de onda significativa: $H_s = \sqrt{2}H_{rms}$).

Uma vez descrito o conceito de energia total contida numa onda, é exposto agora o conceito de fluxo de energia ou potência de onda, que corresponde à taxa de energia transmitida (por unidade de largura de crista da onda) num plano vertical, perpendicular à direção de propagação da onda. Admitindo válidos os pressupostos da teoria linear, a potência de onda pode ser definida como:

$$P = E \cdot C_g \quad (1.15)$$

sendo E a energia associada à onda e c_g a velocidade de grupo. O conceito velocidade de grupo traduz a velocidade com que a energia de um grupo de ondas se propaga. O seu valor é dado pela equação:

$$C_g = 0.5 \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \times \frac{L}{T} \quad (1.16)$$

A potência de uma onda transmite a energia que se propaga desde o avanço da onda até à costa, ao longo da profundidade. Sendo assim, para o conceito de fluxo de energia de uma onda é relevante a direção de propagação, assim como a sua incidência na costa. O seu valor é parametrizado vetorialmente e o seu valor absoluto dependerá da resultante das suas componentes vetoriais.

Outro parâmetro útil para descrever a intensidade marítima é a quantidade de movimento de uma onda (Huges, 2004). Desenvolvido por Longuet e Higgins (1964), este parâmetro representa o fluxo instantâneo da quantidade de movimento horizontal que atravessa um plano vertical paralelo à crista de uma onda. Assim, o valor máximo desta quantidade de movimento, sob a crista de onda, M_f , é dado na forma adimensional (Huges, 2004) pela expressão:

$$\left(\frac{M_f}{\rho g h^2} \right)_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{H}{h} \right) \frac{\tanh kh}{kh} + \frac{1}{8} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \times \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \quad (1.17)$$

O quociente $\rho g h^2$ permite obter adimensionalizar a quantidade do movimento M_f . Esta expressão traduz a quantidade de movimento de uma onda em função da altura de onda relativa (H/h) e profundidade relativa (kh).

Huges (2004) chama no entanto à atenção para o facto da teoria linear de onda não ter em conta o efeito da porção de quantidade de movimento de uma onda acima do nível médio da água, assim como a forma típica das ondas em águas pouco profundas não ser sinusoidal. Na prática, verifica-se

que a quantidade de movimento contida acima do nível médio de uma onda é relevante se quisermos associar este parâmetro a uma resposta realista das estruturas costeiras. Esta omissão torna-se particularmente mais crítica quando se atinge o limite mínimo da altura de onda relativa.

A aproximação pela teoria não linear de onda (p, ex., Fenton.1981) garante uma boa caracterização de ondas de amplitude finita e para qualquer tipo de profundidade de onda. Utilizando a teoria não linear, com o auxílio de métodos computacionais, devido à complexidade das soluções nas condições de fronteira, Huges (2004) calculou a solução para a quantidade de movimento em função dos parâmetros acima indicados, H/h e kh , que depois parametrizou numa solução empírica com dois coeficientes A_0 e A_1 :

$$\left(\frac{M_f}{\rho g h^2}\right)_{max} = A_0 \left(\frac{h}{g T^2}\right)^{-A_1} \quad (1.18)$$

Para ondas irregulares, Huges sugere ainda que deverão ser utilizados parâmetros da agitação no domínio da frequência, como a altura significativa da onda, H_s , e o período de pico, T_p .

De acordo com a equação de conservação do momento, deve haver uma força exercida no obstáculo igual à taxa de variação da quantidade de movimento da onda, a que Longuet-Higgins (1964) designou por «tensão de radiação».

Substituindo as expressões da teoria linear para a pressão e velocidade horizontal (que é máxima na crista da onda e nula ao nível da superfície livre) e integrando ao longo da profundidade e de um comprimento de onda, a tensão de radiação ao longo da direção de propagação é dada por:

$$s_n = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (1.19)$$

Foram assim expostos alguns fundamentos teóricos que vão ser explorados nesta dissertação, cuja metodologia será exposta em detalhe no segundo capítulo.

1.2.3. DEFINIÇÃO DE TEMPORAL

A definição de temporal é normalmente traduzida pela excedência de um determinado valor de altura significativa de onda. Esta definição é abordada em vários trabalhos e portanto inúmeros valores são adotados, dependendo, entre outros, da localização. Para a costa sul continental Portuguesa, o valor limite considerado pelo Instituto Hidrográfico é de 3 metros (<http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php>). Para a costa continental oeste, este valor sobe para 5 m.

Para além deste fator, Mendonza e Jimenez (2006) referem ainda que, para se considerar temporal é necessário um determinado tempo de persistência do estado do mar que no caso da costa Espanhola é de 6 horas.

Nesta dissertação admite-se que uma tempestade, "teria de ter, durante um mínimo de 6 horas, valores de H_s superiores a 3,0 metros. Para além disso, considerou-se a mesma tempestade quando dois períodos de tempestade não se distanciavam entre si no máximo 48 horas" Heitor (2013).

A magnitude de um temporal é determinada seguindo o trabalho apresentado em Heitor (2013), no qual a categorização da energia, E , contida em cada temporal é feita através da estimativa da intensidade energética, de cada temporal, definida pela expressão:

$$I_s = \int E dt \propto \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad (1.20)$$

onde $[t_1, t_2]$ representa o intervalo de tempo em que decorre determinada tempestade marítima e H_s a altura significativa ao longo desse temporal.

Associado ao temporal surge o conceito de *storm surge*, que está associado à sobrelevação do nível do mar devido a baixas pressões e ventos intensos (Heitor, 2013). Esta variável, contudo, não será abordada neste trabalho, limitando-se o mesmo à determinação e classificação de valores associados ao movimento (e ação) da agitação marítima.

1.3. OBJETIVOS

Pretende-se nesta dissertação desenvolver e testar um índice (ou indicador) de "intensidade energética" ou "intensidade da agitação marítima", em situação de temporal, de aplicação para a costa Portuguesa. Serão, em primeiro lugar, analisadas as metodologias existentes, começando por aquela definida por Mendonza e Jimenez, (2011) e utilizada por Heitor (2013) e Sancho et. al., (2013) para a costa de Espinho, onde intervém unicamente a energia da onda por unidade de área. Adicionalmente, analisar-se-ão outras formas de cálculo da intensidade marítima, baseadas noutros conceitos, tais como o fluxo de energia, a quantidade de movimento (por ex., tal como definido por Basco e Mahmoudpour, 2012) e a tensão de radiação incidentes na costa, associados à agitação marítima, e em situação de temporal. O desenvolvimento, teste e comparação da aplicação destes diferentes índices a determinado local ou locais possibilitará a seleção daquele que parecer mais promissor para construção de um índice válido para aplicar em toda a costa Portuguesa.

Esta comparação e seleção permitirá responder a questões como: será importante ter em conta a não linearidade da onda? Em que medida é importante escolher um parâmetro vetorial, i.e., que tenha em conta a direcionalidade da onda, face a outro simplesmente escalar?

2. METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada nesta dissertação para o cálculo da intensidade marítima, incluindo a descrição dos diferentes métodos utilizados no seu cálculo e os procedimentos para se determinar o método energético mais representativo de uma zona.

2.1. CATEGORIZAÇÃO DAS TEMPESTADES

Antes de se proceder à aplicação dos métodos de cálculo da intensidade marítima, é necessário definir a escala de classificação de temporais utilizada nesta dissertação.

A categorização de temporais utilizada segue o trabalho desenvolvido por Mendonza e Jimenez (2011), no qual são definidas cinco classes de temporais, em função do valor da intensidade energética, I_s , determinada pela equação (1.20) (Tabela 2.1).

Classes	$I_s(m^2h)$
Fraca	≤ 250
Moderada	$250 < E \leq 500$
Significativa	$500 < E \leq 700$
Severa	$700 < E \leq 1200$
Extrema	> 1200

Tabela 2.1 – Categorização de temporais (Mendonza e Jimenez, 2011)

2.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DA INTENSIDADE MARÍTIMA

2.2.1. INTENSIDADE ENERGÉTICA

Segundo Mendonza e Jimenez (2011), a intensidade energética associada a cada temporal pode ser determinada através de parâmetros estatísticos obtidos das séries temporais de elevação da superfície de um ponto (ou seja, dados medidos, por exemplo, em boias ondógrafo ou resultados de modelos numéricos) sendo o parâmetro estatístico determinante a altura de onda significativa, H_s .

Assim, a intensidade energética associada a cada temporal, I_s^{storm} , é dada pela integração dos valores das intensidades energéticas ao longo de cada temporal, $I_{s,i}$, (ou conjunto de temporais, para um intervalo de integração mais longo que o de um temporal), que tendo em atenção a eq. (1.20) e substituindo a integração por um somatório de valores discretos, é expressa por:

$$I_s^{storm} = \int E dt \cong \sum I_{s,i} \Delta t = \sum_{j=1}^{storm} H_s^2 \Delta t \quad (2.1)$$

sendo j o número de dados utilizados no cálculo (em que H_s supera o limiar de ocorrência de tempestade), e Δt o intervalo de tempo discreto utilizado na integração (que dependerá essencialmente da discretização temporal dos dados de agitação marítima).

De acordo com o descrito na secção 1.2.3. este indicador foi aplicado à costa de Espinho na dissertação de Heitor (2013) e em Sancho et. al (2013). Note-se que além da aplicação deste índice de intensidade energética, estes autores discutiram ainda gamas de valores para a classificação de tempestades (em cinco classes) e o limite inferior de H_s a partir do qual se considera ocorrer uma tempestade (também abordado na secção 1.2.3. deste trabalho).

2.2.2. POTÊNCIA DA ONDA

O conceito de potência de onda tem em conta o efeito do fluxo de energia de um conjunto de ondas de características diferentes entre si que viajam com uma velocidade igual à velocidade de grupo, c_g , e que atravessa determinada secção vertical. Desta forma a potência de onda num temporal, $I_s P^{storm}$ é dada por:

$$I_s P^{storm} = \int P dt, \quad (2.2)$$

em que a potência da onda, por ser uma quantidade vetorial, o seu módulo P é dado por:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (2.3)$$

No entanto, só será relevante para o cálculo da potência a componente correspondente à perpendicular à linha de costa, pois é esta que causa impacto na costa (através da libertação e dissipação deste fluxo de energia junto à costa). Tendo em conta que o vetor da potência está contido num plano vertical perpendicular ao sentido de avanço das ondas, a sua direcção é preponderante para o valor da parcela do fluxo de energia perpendicular à costa, P_n (que entrará mais tarde para o cálculo da intensidade energética). Recorreu-se então à definição dos ângulos que permitem fazer a parametrização de P_n . Em seguida é descrita a sua metodologia.

Admite-se ser \vec{n} o versor da linha de costa; β o ângulo definido entre o vetor da potência de onda, \vec{P} e a direcção da onda do eixo cartesiano (xx's positivos), Figura 2.1; e γ o ângulo – e sempre o menor ângulo - entre o Norte geográfico e a direcção da linha de costa, ver Figura 2.3, dada pela aproximação a uma reta entre as coordenadas dos pontos extremos da linha batimétrica considerada junto a zona costeira:

$$\gamma = \text{atan}\left(\frac{X_f - X_i}{Y_f - Y_i}\right) \quad (2.4)$$

sendo o ponto extremo inicial definido pelas coordenadas $(X_i; Y_i)$ e o ponto final definido pelas coordenadas $(X_f; Y_f)$. A título de exemplo é exposto o caso de Espinho para se entender melhor os pontos “final” e “inicial”, ver Figura 2.2.

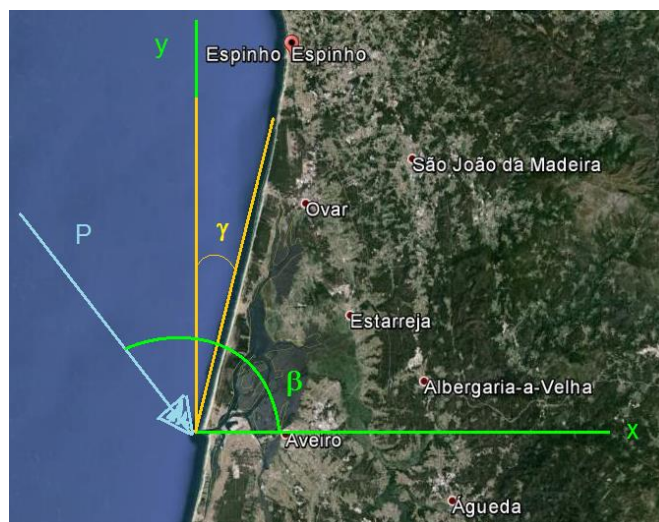


Figura 2.1 – Representação dos ângulos β e γ para o Caso de Espinho (Fonte: Google Maps)



Figura 2.2 – Ilustração dos pontos inicial e final no Caso Espinho (Fonte: Google Maps)

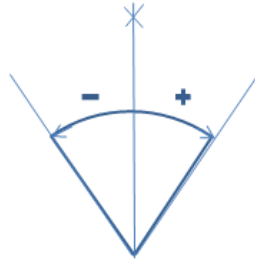


Figura 2.3 – Convenção de sinais para o ângulo γ

A expressão para a potência de onda perpendicular à costa, P_n (em coordenadas cartesianas) é dada por:

$$P_n = P \cos(\gamma + \beta) \quad (2.5)$$

A conversão do ângulo β , que coincide com a direção de propagação da onda é dado em coordenadas náuticas² para coordenadas cartesianas é obtida através de:

$$\beta = 270 - \text{rumo} \quad (2.6)$$

e é válida para a incidência em qualquer quadrante.

Tem-se então que a intensidade marítima total num temporal, através do método da potência da onda, e substituindo a potência total em (2.2) pela potência P_n , é dada por:

$$I_S P_n^{storm} = \int P_n dt \cong \sum_{i=1}^{storm} P_{n,i} \Delta t \quad (2.7)$$

em que, tal como anteriormente, a integração é efetuada durante o tempo de duração em que se considera haver temporal.

2.2.3. QUANTIDADE DE MOVIMENTO DA ONDA

Partindo do princípio que “a força” incidente sobre determinada costa, ou estrutura costeira, resulta da variação (entendida como a deriva total) da quantidade de movimento incidente, Huges (2004) propôs um índice da intensidade das ondas baseado na quantidade de movimento. Mais tarde, Basco e Kletzman (2006) propuseram um índice de classificação de tempestades marítimas baseado neste contexto. Este trabalho foi posteriormente alterado por Basco e Mahoudmpour (2012) e Basco et al. (2013).

² Rumo correspondente à direção de onde vem a agitação marítima, definida a partir do Norte e tomando valores entre 0 e 360°, rondando no sentido horário com origem naquela direção (ver Figura 2.4)

Segundo o parâmetro Coastal Offshore Storm Impulse (COSI) desenvolvido por Basco et al. (2013), a quantidade de movimento total é traduzida por uma parcela resultante do movimento da onda, representada por M , e outra parcela correspondente à sobrelevação do nível do mar (*storm surge*), f_p . A intensidade marítima de um temporal, ISM^{storm} , pode então ser também determinada pela integração (durante um temporal) da quantidade de movimento:

$$ISM^{storm} = \int (f_p + M) dt \quad (2.8)$$

A primeira parcela, f_p , é significativa quando a sobrelevação devida ao vento e depressão atmosférica fenómeno (*storm surge*) é importante, i.e., quando o excesso de pressão (hidrodinâmica) sobre a costa em relação ao existente com o nível médio de água é significativo. Esta parcela pode de facto ser importante em regiões onde a sobrelevação devida ao storm surge é elevada e na ordem de grandeza da altura de onda, como é o caso associado às grandes tempestades no golfo do México que assolam a costa sul dos Estados Unidos da América (e.g. Basco et al., 2013). No entanto, considerando que para a costa marítima Portuguesa, as sobrelevações máximas são da ordem de um metro ou inferiores (e.g., Gama et al., 1997), então aquela parcela pode ser desprezada em relação à segunda, associada à agitação marítima. Além disso, as sobrelevações máximas de storm surge na costa sul não diferem muito das da costa Oeste, pelo que, com o objetivo de distinguir as intensidades energéticas, não seria relevante incluir uma parcela que é semelhante em toda a costa Portuguesa. Assim, neste trabalho, de ora em diante e pelos motivos apresentados, despreza-se a parcela f_p nos cálculos de ISM .

Basco et al. (2013) aproximaram ainda a quantidade de movimento devida à agitação marítima, M , em forma adimensional, pela função:

$$\left(\frac{M}{\rho g h} \right) = A_0 \left(\frac{h}{g T^2} \right)^{A_1} \quad (2.9)$$

onde A_0 e A_1 são parâmetros empíricos que dependem de H/h , dados por:

$$A_0 = 0.5468 \left(\frac{H}{h} \right)^{2.1264} \quad (2.10)$$

$$A_1 = 0.3615 \left(\frac{H}{h} \right)^{0.3516} \quad (2.11)$$

para valores de $\frac{h}{g T^2} \leq 0.01$. Caso contrário os parâmetros são definidos por:

$$A_0 = 0.057 \left(\frac{H}{h} \right)^{2.3393} \quad (2.12)$$

$$A_1 = -0.1685 \left(\frac{H}{h} \right)^{-0.398} \quad (2.13)$$

Utilizando a quantidade de movimento adimensional dada por (2.9), a intensidade marítima, IsM^{storm} , que resulta da quantidade de movimento registada durante um temporal, i.e., integrada no tempo, é determinada através de:

$$IsM^{storm} = \int \left(\frac{M}{\rho gh} \right) dt \cong \sum_{i=1}^{storm} \left(\frac{M}{\rho gh} \right)_i \Delta t \quad (2.14)$$

2.2.4. TENSÃO DE RADIAÇÃO

De acordo com o exposto na secção 1.2.2, a tensão de radiação depende da quantidade de movimento de uma onda. A componente normal do tensor da tensão de radiação, s_{xx} , ou s_n é dada por:

$$s_n = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (2.15)$$

Pode-se então, à semelhança do efetuado para a quantidade de movimento (ver secção anterior), definir a intensidade marítima energética durante um temporal pelo método da tensão de radiação, IsS_n^{storm} , através da expressão:

$$IsS_n^{storm} = \int S_n dt \cong \sum_{i=1}^{storm} S_n \Delta t \quad (2.16)$$

Encontra-se assim finda definição dos métodos de cálculo da intensidade marítima ou “intensidade energética” devida à agitação marítima, como é no sentido mais lato utilizado o termo “energético” ao longo desta tese.

2.3. MODELO NUMÉRICO SWAN

O modelo numérico SWAN (abreviação de Simulating Waves Nearshore) é um modelo de propagação espectral de ondas de terceira geração, do qual são obtidas estimativas realísticas de parâmetros da agitação marítima em zonas costeiras, a partir do conhecimento das profundidades e do campo de ventos e correntes na área do modelo, bem como das condições de fronteira (SWAN, 2014). O modelo tem em conta fenómenos físicos como o efeito do vento e o efeito das correntes sobre a agitação marítima.

Para efetuar uma corrida são necessários preparar alguns ficheiros, que caracterizam o tipo de corrida (ou cálculo) que se pretende, as condições iniciais e a matriz espacial em que vai decorrer a simulação. São os ficheiros (SWAN - USERMANUAL, 2014):

- Batimetria do domínio de cálculo, através de uma grelha computacional com toda a informação batimétrica, que é fornecida pelo ficheiro “xyz.bot”.

- Características do tipo de corrida no espaço e no tempo (regime estacionário ou não estacionário), condições físicas consideradas e condições de fronteira do problema, através de um ficheiro SWN.
- Dados das condições de agitação nas zonas fronteiriças do domínio de cálculo (ou seja, boia ao largo b_{off}), através dos ficheiros PRN.

Após a simulação, o modelo SWAN devolve como dados de saída ficheiros (como por exemplo “tabela_b13.tbl”) para qualquer ponto da grelha com um conjunto de parâmetros característicos da agitação nesse ponto, entre os quais a direção de ondulação (Dir), o período de Pico (TPs), a altura de onda (H_s) e a potência da onda nas duas componentes da propagação, x e y , - com a notação, respetivamente X-Transp e Y-Transp e os valores das tensões de radiação, também das direções x e y .

Para o presente trabalho, tal como em Heitor (2013), utilizaram-se determinadas opções do modelo na sua aplicação aos casos de estudo, que se descrevem em seguida.

A primeira entrada do modelo é dada na secção *MODEL INPUTS*, onde são inseridas as condições de batimetria – comando *SET* - e a convenção de coordenadas - comando *NAUTical*. Note-se que a convenção náutica tem como referencial a direção Norte e o sentido positivo é o sentido dos ponteiros do relógio, ver Figura 2.4.

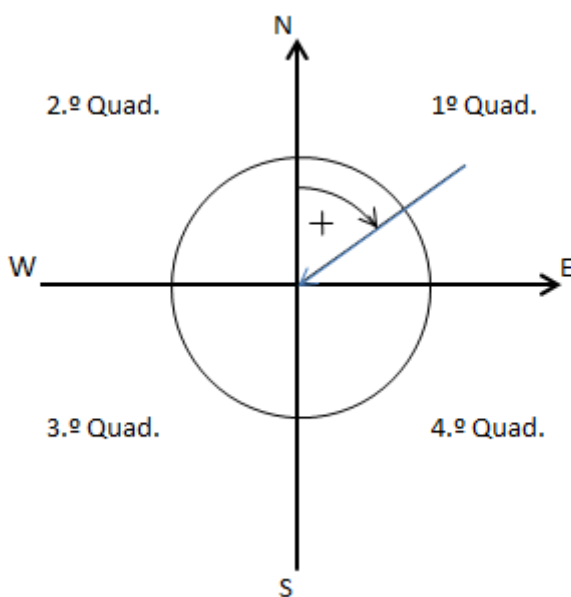


Figura 2.4 – Convenção de coordenadas Náuticas

Nesta dissertação optou-se pela corrida não estacionária (uma vez que não se pretende a corrida dependente do tempo), selecionando a opção *NONSTationary* do comando *MODE*.

Em relação ao tipo de coordenadas, mantiveram-se as coordenadas cartesianas – comando *CARTesian*.

O passo seguinte foi a definição do domínio de cálculo onde se desenvolveu a corrida. Esta informação está contida no comando *CGRID*. O tipo de malha utilizada nesta dissertação é a malha regular – comando *REG*.

Para limitar as direções de ondulação predominantes, foi utilizado o comando *SECTOR* que, por exemplo, no caso da costa Algarvia limitou os setores entre os 60° e 300°; isto é, eliminou-se a possibilidade de ocorrência de ondas provenientes das direções 300° a 60°, ou seja, com um leque de 120° centrado na direção Norte. Tal permitiu diminuir o espaçamento direcional na resolução das equações governantes, para o mesmo número total de componentes espectrais direcionais.

É necessário introduzir ainda as características da malha batimétrica, tais como a sua origem, o comprimento, a inclinação dos eixos e a resolução. Para o efeito recorre-se ao subcomando *BOTTOM*, na opção *INPgrid*.

Após as definições do domínio de cálculo, é também introduzida a informação das coordenadas x, y e z de cada ponto da malha num ficheiro introduzido no comando *READinp BOTTOM*.

Quanto à agitação incidente, definiu-se um espectro JONSWAP, no comando *BOUND SHAPespec*. Os dados de entrada de agitação marítima para cada fronteira do domínio, são introduzidos através de ficheiro do tipo “TPAR” (ver SWAN – USERMANUAL, 2014), em formato ASCII. Este ficheiro contém cinco colunas: a primeira corresponde à data (em formato ISO), a segunda coluna aos valores de altura significativa de onda, a terceira coluna ao período de pico, a quarta coluna à direção de propagação de onda e a quinta coluna ao parâmetro de espalhamento da onda. Quanto a este último valor, dado que os dados originais a utilizar não continham informação da “largura” (ou dispersão ou espalhamento) da direção da agitação marítima, então foi por defeito considerado com o valor “25°”. Será fornecido um ficheiro para cada fronteira da malha.

Quanto ao modo em que é efetuada a simulação, optou-se pelo modo em terceira geração - comando *GEN3*. É possível considerar-se assim o vento, as interações quádruplas e o *whitecapping* (comando *WESTH*). Foi considerado o fenómeno de rebentação – comando *BREaking*, o fenómeno de atrito entre a onda e o fundo – comando *FRICtion* - e o comando *TRIad*.

Há a referir que a garantia que o método numérico de resolução para os modos de corrida estacionária ou não estacionária é forçada pelo comando *PROP BSBT*.

2.4. PROGRAMA IS_STORM

O programa ISTORM foi desenvolvido no âmbito desta dissertação em Matlab, que é uma linguagem de alto nível para computação numérica, visualização e programação, que pode ser utilizado para analisar dados (fonte: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>).

O programa, com base nos resultados obtidos pelo modelo SWAN no que se refere às condições de agitação na batimétrica dos 15 m, seleciona os casos em que as condições de agitação são de temporal, ou seja, em que a altura de onda ultrapassa as condições estabelecidas para ser considerada situação de temporal, e, para estes casos, calcula a intensidade energética, a potência da onda, a quantidade de movimento e a tensão de radiação.

3. CASOS DE ESTUDO

São apresentados em seguida os casos de estudo em que se vão aplicar as metodologias de classificação da intensidade “energética” (no sentido lato atrás referido). O primeiro caso de estudo abordado será o litoral de Espinho, o segundo caso de estudo será o litoral da Ria Formosa (Algarve). Para o primeiro caso, já se possuíam dados do modelo de propagação de ondas junto à costa (obtidos por Heitor, 2013), pelo que o ponto de partida é a análise dos métodos de intensidade energética.

3.1. COSTA LITORAL DE ESPINHO

Na dissertação de Heitor (2013), foi efetuada uma simulação de propagação de agitação marítima para a costa de Espinho. A zona em estudo abrange toda a região costeira envolvente de Espinho, começando na zona de Póvoa de Varzim e indo até Aveiro (Figura 3.1). A malha tinha uma extensão de 70 km na linha perpendicular à costa e 100 km na direção paralela à costa. Foi utilizada uma resolução espacial de 500 m, com as características que se apresentam na Tabela 3.1.

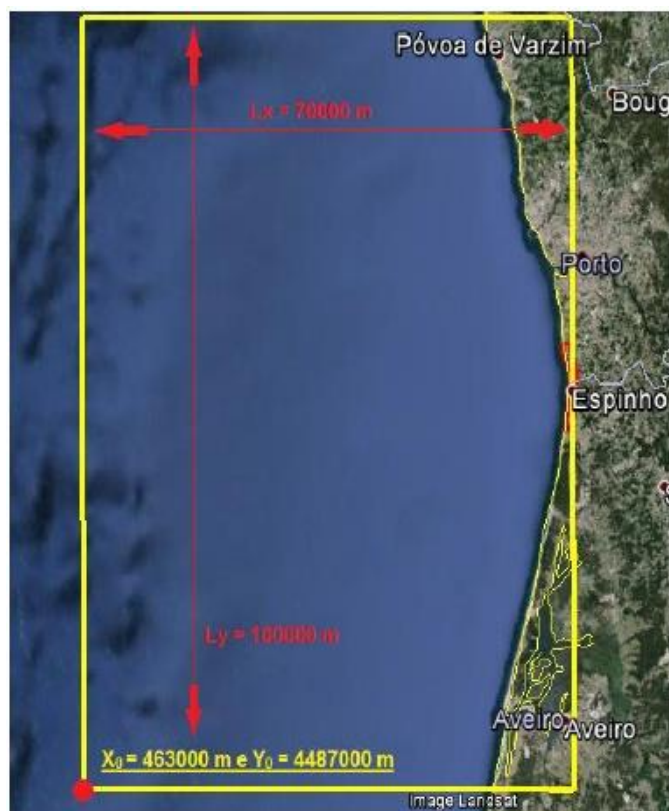


Figura 3.1 – Ilustração da malha de simulação do Caso de Espinho (Fonte: Heitor, 2013)

Para este caso de estudo foram determinadas quantidades desprezadas por Heitor (2013), nomeadamente, a potência da onda e os gradientes das tensões de radiação. O intervalo de tempo

efetuado foi entre 1953 e 2009, divididos em séries de 10 anos, dando assim num total de 6 séries temporais (por exemplo, de Janeiro de 1953 a Dezembro de 1962). Foram obtidos resultados para 26 pontos da malha batimétrica para cada uma destas séries temporais, distribuídos ao longo da costa, tal como indicado em Heitor (2013).

Origem (km)	$X_0=463.0 ; Y_0=4487.0$
Dimensões (km)	$L_x=70 ; L_y=100$
Resolução (m)	$\Delta x=500 ; \Delta y=500$
Nº de pontos da malha	28000

Tabela 3.1 – Características da malha do caso de estudo de Espinho (Fonte: Heitor, 2013)

3.1.1. RESULTADOS DE INTENSIDADE ENERGÉTICA

Tendo em conta a grande quantidade de dados de séries temporais, recorreu-se a um programa em linguagem *MATLAB*, por forma a seleccionar os dados considerados como temporal, contidos nos ficheiros de saída do programa *SWAN*. Este programa, designado por *Is_Storm.m*, recebe como entrada as séries temporais em cada ponto da malha (como por exemplo *tabela_b_13.tbl*) e devolve como um ficheiro com o nome *Is_Out.dat*, com os valores das “intensidades energéticas durante cada temporal”, calculados para os métodos abordados. Ou seja, para cada temporal teremos quatro valores de intensidade energética – I_s , I_{sPn} , I_{sSn} e I_{sM} . Este ficheiro contém ainda colunas com valores médios de parâmetros como o período de pico, a altura de onda, a direcção de propagação de onda, as datas de início da ocorrência deste temporal e a duração do mesmo.

Resumindo, para ficheiro de entrada é determinado outro ficheiro com a série de intensidades energéticas em período de temporal.

Uma vez determinada as “intensidades energéticas”, realizaram-se comparações entre os quatro métodos em análise. Como os diferentes indicadores das intensidades energéticas têm diferentes unidades, em resultado de representarem diferentes quantidades e aproximações (vide cap. 2), optou-se por realizar a adimensionalização de cada um, permitindo assim a sua comparação direta. Para o efeito, optou-se pela divisão dos valores de determinado I_s pelo valor médio global dessa variável, calculado pela média dos diferentes valores de intensidade obtidos numa determinada localização. Ou seja, para cada método e para cada localização, determinaram-se os valores adimensionais, I_s' :

$$I_s' = \frac{I_{s_i}}{I_{s_{med}}} \quad (3.1)$$

em que I_{s_i} é a “intensidade energética” de determinado temporal i (obtido por um dos quatro métodos aqui analisado) e $I_{s_{med}}$ é a média dos valores da série de “intensidades energéticas por temporal”.

Apresenta-se na Tabela 3.2 os referidos valores das intensidades energética médias de cada série, para o ponto intermédio do litoral de Espinho, nomeadamente a “localização 13” (Figura 3.2). Apresenta-se ainda na mesma tabela os valores máximos e mínimos dessas séries, permitindo observar que as várias grandezas podem ter ordens de grandeza muito diferentes e daí só poderem ser devidamente comparadas através da adimensionalização indicada na equação (3.1).

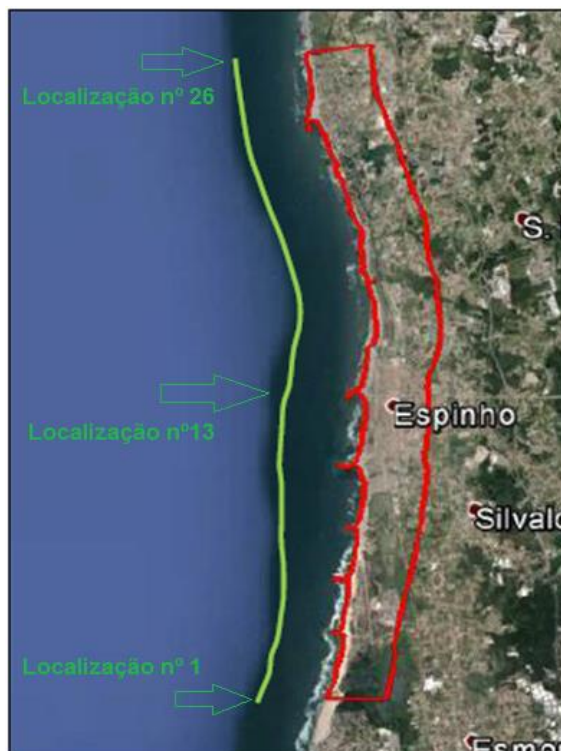


Figura 3.2 – Linha da batimétrica dos 15 metros ao longo do litoral de Espinho e localizações dos pontos extremos e intermédio (Fonte: Heitor, 2013)

	Is (m ² .h)	Is_Pn (Wh/m)	Is_Sn (Nh/m ²)	Is_M (h)
media	851,26	2304620,41	1215,75	0,52
minimo	54,03	331874,37	80,92	0,03
maxima	7497,00	17757022,67	11997,58	4,83
desv_padr	1089,16	2805899,96	1744,34	0,71

Tabela 3.2 – Representação de valores limite de Intensidades Energeticas.

As Figura 3.3 a Figura 3.8 representam os gráficos de dispersão dos valores determinados por cada par de metodologias de “intensidades energéticas” registados na referida localização n.º13, sobre a batimétrica -15m em frente a Espinho, ao longo dos 55 anos. Cada gráfico mostra apenas 2 métodos em simultâneo. É apresentado ainda, para cada gráfico, o coeficiente de determinação (igual ao quadrado do coeficiente de correlação de Pearson), R^2 .

Verifica-se que os valores com melhor ajuste ao se fazer aproximação a uma reta são a comparação feita entre os métodos de tensão de radiação, $IsSn'$, e intensidade energética, Is' , e entre a intensidade energética, Is' , e a intensidade pela quantidade de movimento, IsM' .

Para a primeira correlação, entre Is' e $IsPn'$, vê-se que o maior número de registos encontram-se nos valores normalizados de 0 e 3.5. Em relação a valores extremos, o valor máximo foi registado a 13 de Dezembro de 1989, com valores de intensidade normalizadas (8.806; 8.859), com uma duração de 348 horas (aproximadamente 15 dias). Já o valor mínimo foi registado na data de 17 de Fevereiro de 1954, com o par de valores normalizados (0.663; -0.144).

Relativamente à correlação Is' e IsM' , esta apresentada também um bom ajuste ao longo de todos os registos de intensidade energética (Figura 3.4) sendo que o valor máximo verifica-se igualmente na data de 13 de Dezembro de 1989, com o par de valores normalizados (8.806; 8.634), e o valor mínimo na data de 17 de Dezembro de 1954, com registos de (0.070; 0.072).

Ainda na observação dos gráficos, verifica-se para o caso de estudo de Espinho, que os resultados obtidos pelo fluxo de energia, IsP' não permitem obter boas correlações com qualquer um dos outros métodos de intensidade marítima. Outro fator importante a salientar nestes gráficos é a relação entre IsM' e $IsSn'$, que apesar da sua boa correlação, para valores baixos esta relação apresenta elevada dispersão de valores.

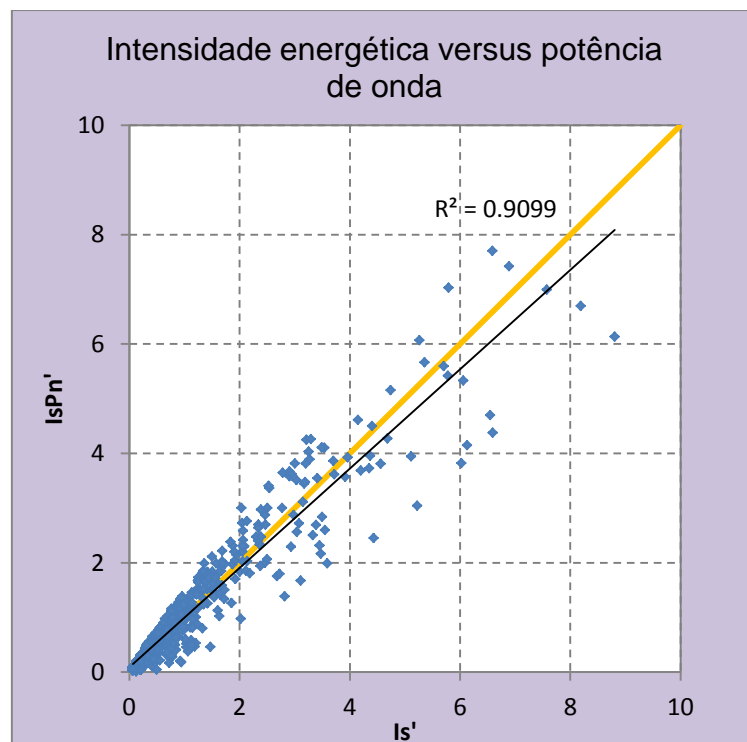


Figura 3.3 – Gráfico de comparação entre a intensidade energética e a intensidade de potência de onda.

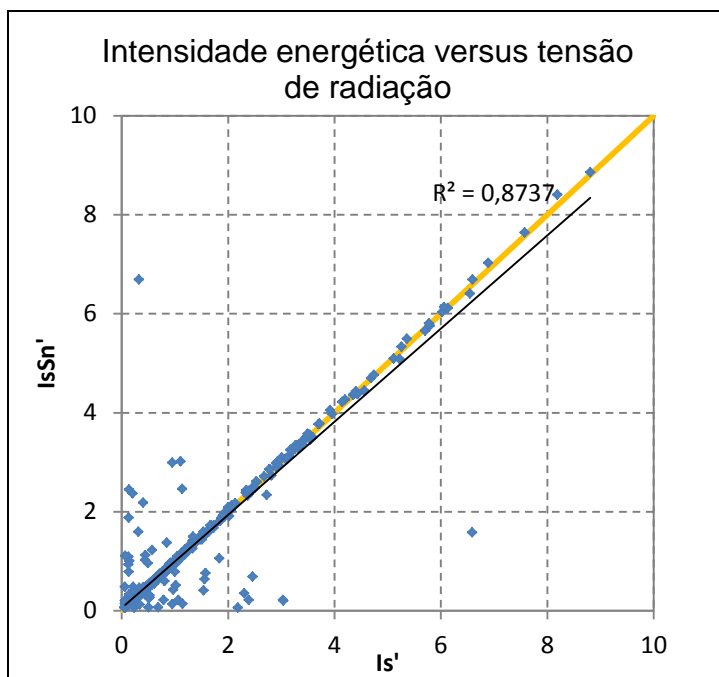


Figura 3.4 – Gráfico de comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela tensão de radiação

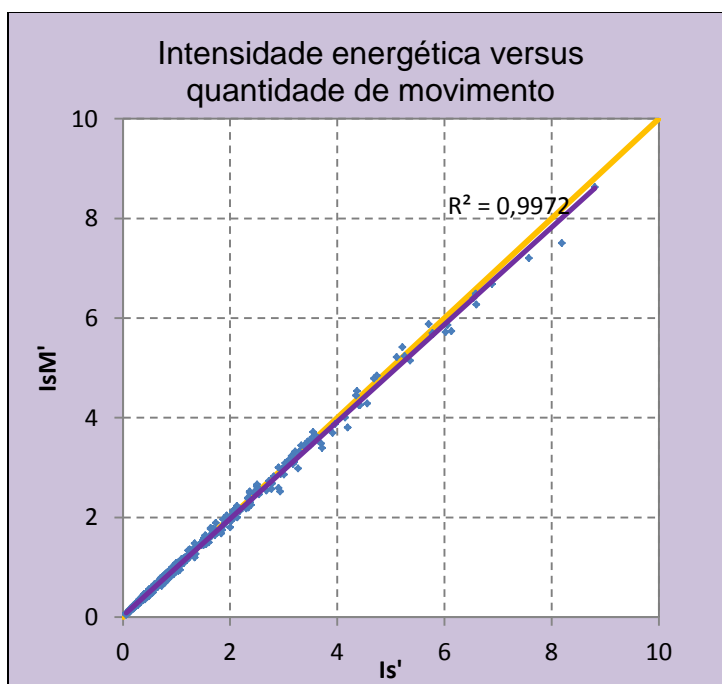


Figura 3.5 – Gráfico de comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela quantidade de movimento

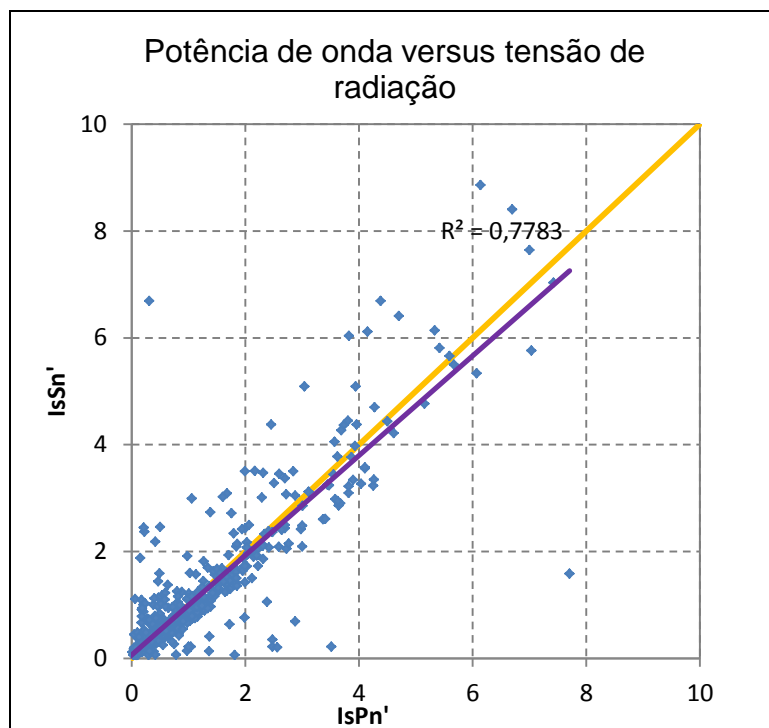


Figura 3.6 – Gráfico de comparação entre a intensidade pela potência de energia e a intensidade pela tensão de radiação.

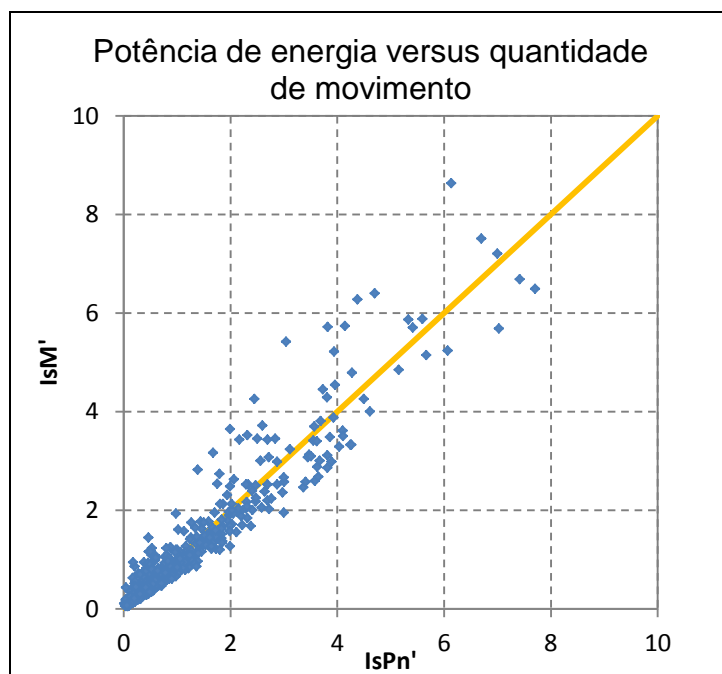


Figura 3.7 – Gráfico de comparação entre a intensidade pela potência de energia e a intensidade pela quantidade de movimento

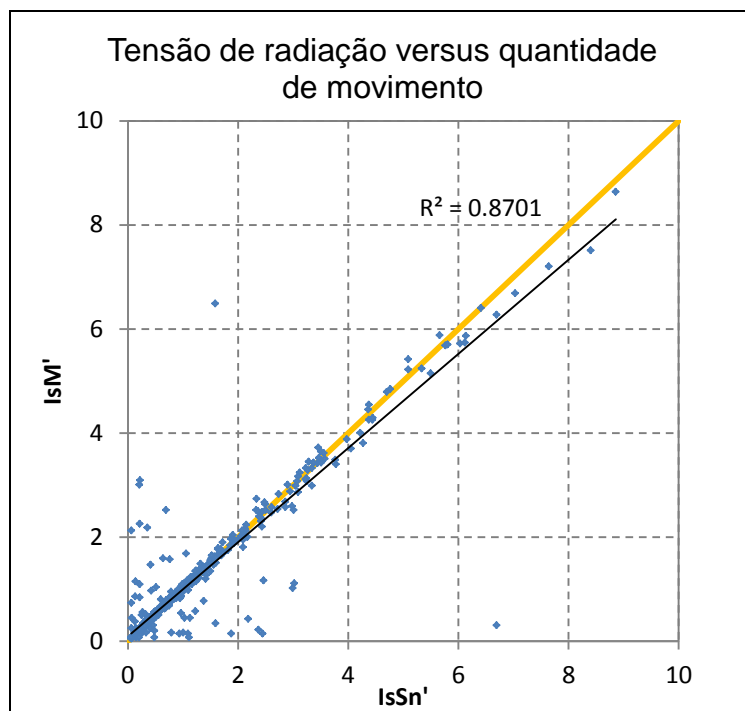


Figura 3.8 – Gráfico de comparação a intensidade pela tensão de radiação e a intensidade pela quantidade de movimento.

A Figura 3.9 mostra as séries temporais dos valores adimensionais das intensidades energéticas determinados pelos quatro métodos. Esta figura confirma que estas quatro séries estão muito bem correlacionadas, sendo as diferenças muito subtis à escala apresentada. Não é assim possível concluir, para já, sobre a vantagem ou maior adequação de um método sobre qualquer um dos outros.

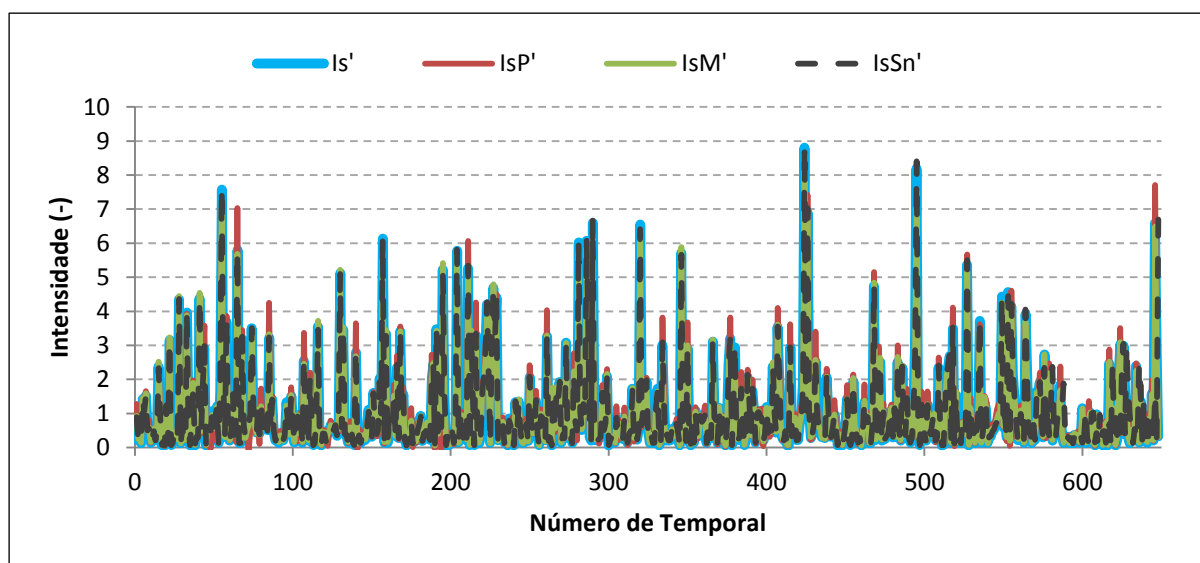


Figura 3.9 – Série de intensidades energéticas adimensionais, parametrizadas pelos quatro métodos, para os 56 anos do caso de Espinho (localização 13)

3.2. LITORAL DA RIA FORMOSA

A costa Sul Algarvia apresenta uma extensão de 160 km, desde a Ponta de Sagres até à foz do rio Guadiana. Pela sua orientação é abrigada da ondulação dominante de NW, altamente energética (Alveirinho Dias, 1988). Tendo troços com diferentes orientações da linha de costa, este litoral responde de forma diferente à agitação marítima que o atinge. Quanto à litologia, a costa apresenta dois tipos específicos: sistema de arribas desde a Ponta de Sagres até Vale do Lobo e daí em diante, a litologia apresenta-se do tipo arenoso.

A área de estudo inicia-se na Quarteira e termina no sector leste da Ria Formosa. Mais a Oriente de Quarteira, no sotavento algarvio, encontra-se a Ria Formosa. Localizada no concelho de Faro é um parque de reserva natural (Parque Natural da Ria Formosa, ICFN, 2015) e apresenta um sistema de ilhas-barreira, proveniente da adjacência de planícies costeiras associadas a regimes de micro marés (de 0 a 2 metros) ou, no presente caso, a regimes de meso marés (de 2 a 4 metros), (Alveirinho, 1988).



Figura 3.10 – Ilustração da Ria Formosa, em Faro (Fonte: www.cm-faro.pt)

A constituição deste conjunto de ilhas, na orientação de W para E é: península de Ancão, ilhas de Barreta, da Culatra, da Armona e de Tavira, ver Figura 3.10.

No seguimento da costa desde Quarteira, a península de Ancão apresenta alinhamento NW-SE e apresenta um comprimento de 10 km; a ilha da Barreta apresenta uma forma encurvada, com uma extensão de 8000 m, tendo o ponto mais meridional do território Português continental – o cabo de Santa Maria.

Em relação às ilhas de Culatra, de Armona e Tavira, as ilhas têm direção SW-NE, tendo a ilha de Armona um comprimento aproximado de 9 km e a ilha de Tavira, 11 km. Em relação à ilha da Culatra, a mesma varia de comprimento ao longo de décadas devido ao alargamento, abertura e fecho periódico das barras de maré limítrofes.

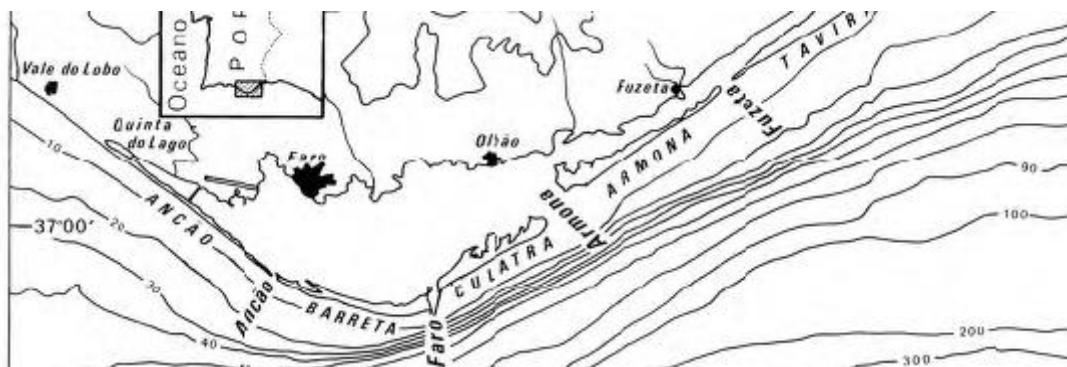


Figura 3.11 – Apresentação do sistema ilhas-barreira de Ria Formosa (Fonte: Alveirinho Dias, 1988)

A fim de comparar resultados obtidos nesta dissertação, serão apresentados alguns resultados da previsão da agitação marítima do trabalho desenvolvido anteriormente por Costa et al. (2001). Nesse trabalho, a fim de caracterizar o clima da agitação marítima, foram determinadas distribuições de frequência relativa de alguns parâmetros, como por exemplo, a altura significativa de onda (determinada a partir do momento de ordem zero), H_{m0} , o período de pico médio (TP) e a direção média (THTP) para a costa sul Algarvia, a partir de dados medidos na boia ondógrafo de Faro, ao largo da costa.

Relativamente à altura de onda H_{m0} , aqueles autores determinaram que a maioria dos valores de altura significativa de onda encontra-se abaixo de 1 metro, com uma frequência de 68%, enquanto que para valores superiores a 3 metros apresentaram-se frequências de 2% (Figura 3.12). A média de H_s é 1 metro.

Foi registado na costa Algarvia valores de período de pico médio na ordem dos 3 a 5 s, com a distribuição de frequências relativa indicada na Figura 3.13. Relativamente à direção média da ondulação, foram registadas direções para os quadrantes SW-W, com uma frequência de 71%, e SE, com 23% (Figura 3.14).

Relativamente à duração de temporal, Costa et al (2001), concluíram que os temporais unidirecionais não persistiram mais do que 5 dias, embora seja superior à frequência relativa de observações de temporais que duram entre 2 e 5 dias (Figura 3.15).

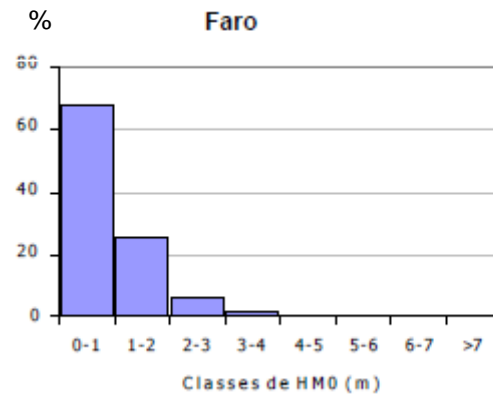


Figura 3.12 – Distribuição de frequência de H_{m0} (Costa *et al.*, 2011)

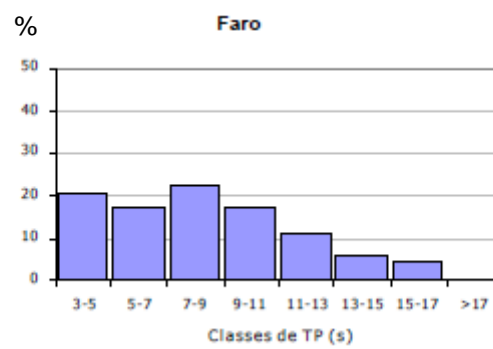


Figura 3.13 – Distribuição de frequência relativa do período (Costa *et al.*, 2011)

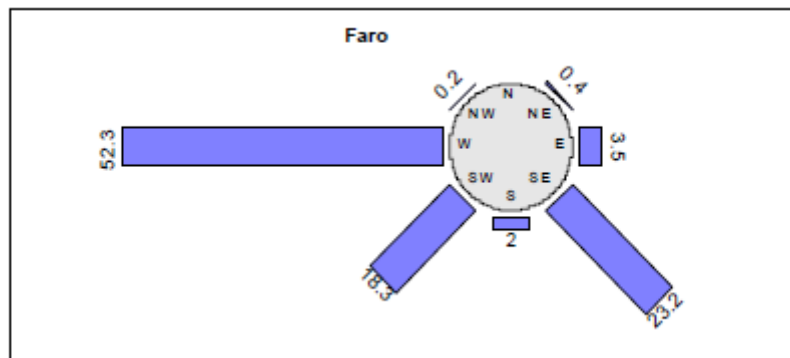


Figura 3.14 – Distribuição da frequência relativa da direção de onda (Costa *et al.*, 2011)

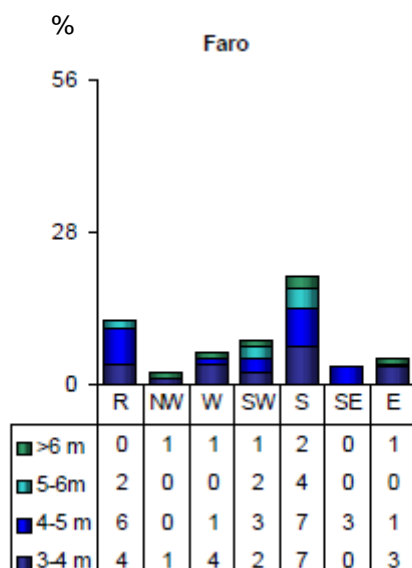


Figura 3.15 – Distribuição conjunta entre altura máxima e PCA(Costa et al. 2001)

3.2.1. DADOS DE BASE, BATIMETRIA E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Para o cálculo da agitação marítima junto à costa no presente caso de estudo, foi adotada uma malha retangular e regular que abrange o tramo do litoral Algarvio inserido entre a Quarteira e a ilha de Tavira. A malha inicia-se ao longo do litoral e prolonga-se até ao largo da costa, apresentando as dimensões de 75 km na direção E-W e 35.5 km, na direção N-S (Figura 3.16 e Tabela 3.3). A resolução espacial da malha é de 500 m.



Figura 3.16 – Ilustração e dimensões da malha batimétrica

Origem (m), Coordenadas UTM	$X_0=-17000$	$Y_0=-324000$
Dimensões	$L_x=75000$	$L_y=35500$
Resolução (m)	$\Delta_x=500$	$\Delta_y=500$
N.º pontos de <i>output</i>	21	

Tabela 3.3 – Características gerais da malha

A boia (ou localização) escolhida como ponto de partida da propagação da agitação marítima, ao largo, *b_off*, (Figura 3.17), está localizada no ponto com as coordenadas 36.75°N; 8.00° W. Os valores das séries temporais da agitação marítima neste ponto foram fornecidos pelo banco de dados SIMAR-44, malha de Cádiz, e pelo conjunto de dados WANA a partir do ano de 1958 (sendo o ponto *b_off*, mais precisamente o ponto WANA_1048047, para este sistema de dados) e podem ser consultados no portal da Agência Espanhola “Puertos del Estado”: http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html.

A partir destes dados são elaborados os três ficheiros (designados por “TPAR” no programa SWAN) que determinam as condições nas três fronteiras marítimas do domínio de cálculo. Para o caso da Ria Formosa os pontos fronteiriços a considerar são os que pertencem a linhas nas direções: Este, Oeste e Sul (Figura 3.17).

Note-se que, dado que as condições a impor ao longo de cada fronteira são constantes espacialmente, na fronteira sul, pelo facto de a mesma estar “ao largo” e ser relativamente curta (75 km) à escala oceânica, é natural que esta agitação marítima seja relativamente homogênea e portanto o erro em assumi-la constante seja efetivamente muito pequeno. No entanto, nas fronteiras este e oeste, variando a profundidade desde zonas profundas até pequenas profundidades, irá ocorrer, entre outros fenómenos, refração das ondas e portanto não será correto impor nessas fronteiras condições de espacialmente uniformes dos parâmetros da agitação marítima. Contudo, conforme testado por Heitor (2013), desde que as fronteiras laterais estejam suficientemente longe da área específica de estudo, o erro em se imporem condições de agitação uniformes nas mesmas, não será repercutido nos resultados para a área central de interesse. Assim, no presente caso, teve-se em atenção esta condicionante, colocando as fronteiras laterais a uma distância suficientemente afastada da parte leste da península do Ancão e das ilhas da Barreta e Culatra, onde se pretende determinar a intensidade energética.

Os dados são hexahorários e fornecem a altura de onda significativa (H_{m0}), o Período de Pico (TPs) e Direção de onda (DirM). Os ficheiros de dados contêm 5 colunas no total: a primeira coluna corresponde a data e hora³, a segunda coluna a H_{m0} , a terceira coluna ao dado TPs, a quarta coluna ao dado DirM, e a quinta coluna ao dado “spread”, que consiste no parâmetro de espalhamento da

³ A data e a hora são separadas por um ponto; a hora contém sempre 5 algarismos.

ondulação. Por ausência de dados deste parâmetro nas séries de reconstituição da agitação marítima provenientes das bases de dados SIMAR e WANA, o mesmo foi considerado constante e igual a 25°.

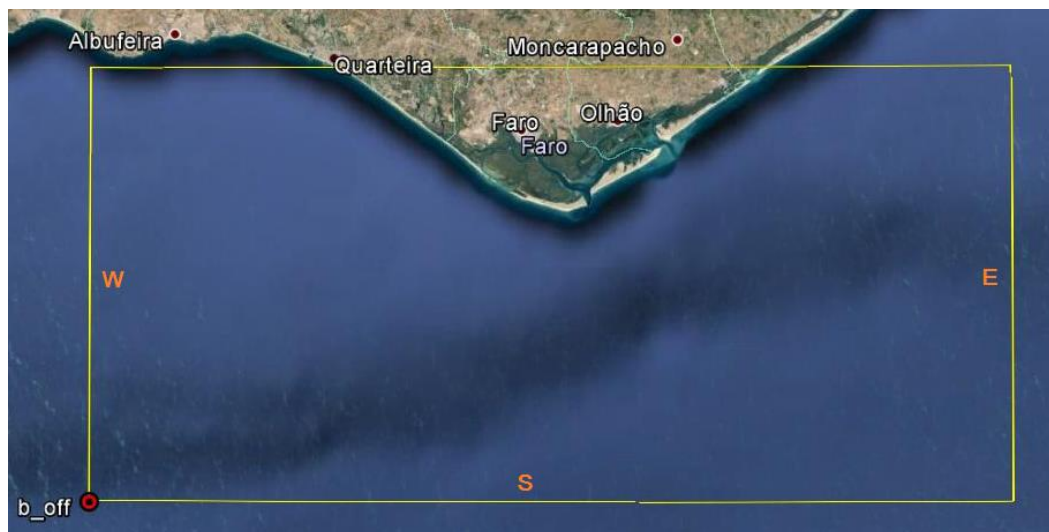


Figura 3.17 – Ilustração das fronteiras do domínio de cálculo (Fonte: Google Maps)

Foi efetuada a simulação do modelo SWAN para uma amostra de 55 anos de dados, distribuída em séries de 10 anos (e 5 anos para o último caso), por forma a rentabilizar o tempo de corrida do modelo de propagação de ondas. Sendo assim as séries temporais a considerar são:

- Entre Janeiro 1958 e Dezembro 1968;
- Entre Janeiro 1969 e Dezembro 1978;
- Entre Janeiro 1979 e Dezembro de 1988;
- Entre Janeiro de 1989 e Dezembro de 1998;
- Entre Janeiro de 1999 e Dezembro de 2008;
- Entre Janeiro de 2009 e Fevereiro de 2013.

É importante frisar o facto de que a representatividade das séries temporais é posta em causa, uma vez que há falhas nos dados e a sua distribuição varia ligeiramente entre meses de um ano e entre períodos sazonais (de Verão e Inverno), (vide Tabela 3.4). Efetivamente, o mês com maior número de falhas é Fevereiro e o mês com menores falhas é Março, Abril e Maio. Não obstante, dado que o número de falhas no período de inverno é igual a 948 e no período de verão igual a 908, estes valores são suficientemente próximos para se assumir que existe igual número de falhas no inverno e no verão, correspondentes a valores médios da ordem de 0.3% do total dos possíveis dados no período em análise.

Analogamente ao caso de Espinho, a informação batimétrica da malha foi obtida através do site <http://www.emodnet-hydrography.eu>, no qual as coordenadas, que inicialmente são geográficas, foram convertidas para coordenadas retangulares, de modo a serem utilizadas no modelo *SWAN*. Para a batimetria dos pontos de saída da malha, foram escolhidos pontos com profundidades médias

da ordem de 15 metros, uma vez que se pretende determinar a intensidade energética junto à costa, i.e., em que a onda já tenha sofrido por exemplo a refração do largo até à costa, mas a uma profundidade suficientemente longe de forma a que não tenha ainda ocorrido em particular a rebentação de ondas, que reduziria a energia da onda, pois esta energia dissipada é em parte aquela responsável pela erosão costeira e que interessa assim incluir também na quantificação da intensidade energética.

	nº falhas	% falhas
Jan	111	0.22%
Fev	364	0.72%
Mar	84	0.17%
Abr	84	0.17%
Mai	84	0.17%
Jun	252	0.50%
Jul	188	0.37%
Ago	180	0.36%
Set	120	0.24%
Out	149	0.29%
Nov	110	0.22%
Dez	130	0.26%

Tabela 3.4 – Representatividade dos dados para a costa Algarvia

A malha foi discretizada com um espaçamento de 500 metros, em ambas as direções. Em função desta informação, foram seleccionados 21 pontos como pontos de saída dos resultados, afastados entre si de 500 m. O ponto mais a Oeste é designado por ponto 1, com as coordenadas $X_1 = 0$ m e $Y_1 = 291000$ m, e o ponto mais a Este corresponde ao ponto 21, com coordenadas $X_{21} = 40000$ m e $Y_{21} = -290500$ m. A sua representação pode ser consultada na Figura 3.18. O sistema de coordenadas para os pontos é o sistema UTM e a batimetria de cada ponto é obtida na opção Depth, do modelo numérico SWAN. As coordenadas e profundidade de todos os pontos são indicadas na Tabela 3.5.



Figura 3.18 – Esquema de localização dos dados de saída da malha do Caso de Estudo Algarvio

Ponto (n)	Xn (m)	Yn (m)	Batimetria (m)	Ponto (n)	Xn (m)	Yn (m)	Batimetria (m)
1	0	-291000	16.764	12	22000	-301500	26.139
2	2000	-292000	17.353	13	24000	-300500	16.276
3	4000	-292500	16.200	14	26000	-299000	10.637
4	6000	-294000	17.188	15	28000	-298500	15.390
5	8000	-295000	17.447	16	30000	-296000	21.427
6	10000	-296000	16.957	17	32000	-296000	16.709
7	12000	-297500	17.657	18	34000	-295000	18.086
8	14000	-299000	16.328	19	36000	-294000	17.235
9	16000	-301000	17.579	20	38000	-292500	17.727
10	18000	-301500	17.464	21	40000	-290500	17.145
11	20000	-301500	13.641				

Tabela 3.5 – Coordenadas dos pontos da malha batimétrica

3.2.2. RESULTADOS DOS PARÂMETROS DA AGITAÇÃO MARÍTIMA SOB TEMPORAL

A partir dos resultados do modelo de propagação de ondas, para o conjunto de 55 anos, determinaram-se, para cada localização, os períodos em que ocorreram temporais. Para se considerar um evento de temporal o limiar mínimo a considerar é o valor de altura significativa de onda de 3 metros; a persistência do temporal deverá ter um mínimo de 6 horas e deverá ocorrer mais de 48 horas com H_s abaixo do referido limiar para se considerarem eventos de temporal independentes entre si.

Como foi dito na secção 3.1.1, os resultados foram obtidos recorrendo a uma rotina de cálculo em Matlab. A partir deste passo, à semelhança do caso de Estudo de Espinho, os valores resultantes do caso de estudo foram depois analisados na folha de cálculo EXCEL, no qual se determinaram os valores mínimos, máximos e médios dos parâmetros de agitação marítima, assim como os valores das intensidades energéticas. É feita em seguida a exposição dos resultados obtidos na presente dissertação.

Para começar, comentam-se os gráficos que se apresentam em anexo (Figura I.1 a Figura I.12), dos valores de H_s máximo, T_p máximo e Dir média em cada temporal, para quatro localizações, de ocidente para oriente ao longo da linha batimétrica aproximada dos 15 m de profundidade: localização n.º 1, que corresponde ao ponto mais a oeste da costa; a localização n.º 21, o ponto mais a Este; as localizações n.º 6 e n.º 15 são intermediárias entre as localizações n.º 1 e n.º 21 (Figura 3.18).

Para a localização n.º 1 foi identificado um total de 171 temporais, enquanto que na localização n.º 6 foram verificados 253 temporais. Na localização n.º 15 registaram-se 54 temporais temporais e para a localização n.º 21 o número total de eventos contabilizados foram apenas 37 temporais. Esta discrepância e diminuição do número de eventos de temporal (i.e., com Hs superior a 3 metros) de oeste para leste está associada principalmente à orientação e exposição da costa à agitação marítima mais gravosa, que como identificado por Costa et al. (2001), provém com maior frequência do quadrante Sul a Oeste (Figura 3.15). Logo, nas praias orientadas a SW, correspondentes aos pontos 1 a 10, ocorre maior número de temporais que nas praias orientadas a SE (localizações 13 a 21). Além do mais, pelo efeito da refração das ondas, existem ainda diferenças significativas nas localizações 1 e 6, bem como nas localizações 15 e 21.

A Tabela 3.6 resume para cada uma destas quatro localizações (1, 6, 15 e 21) os valores máximos de Hs, Tp, duração da tempestade e intensidade energética do temporal (determinado de acordo com a equação (2.1). Mais um vez, observa-se que estes valores são menores nos pontos a oriente do Cabo de Santa Maria, do que naqueles a ocidente deste mesmo Cabo. É de realçar que a duração dos maiores temporais é cerca de 4,5 vezes maior a ocidente (cerca de 180 horas ou 7,5 dias) do que a oriente (cerca de 40 horas ou quase 2 dias). Curiosamente, apesar de terem ocorrido mais temporais na localização 1 do que na 6, é nesta última que ocorreu o máximo de Hs, da duração de temporal e da intensidade energética.

Localização n.º 1			
Máx_Is ($m^2.h$)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
2784,39	180	6,94	22,01
Localização n.º 6			
Máx_Is ($m^2.h$)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
3974,34	192	7,53	21,91
Localização n.º 15			
Máx_Is ($m^2.h$)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
970,37	42	6,15	19,87
Localização n.º 21			
Máx_Is ($m^2.h$)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
831,63	42	5,85	19,79

Tabela 3.6 – Apresentação de valores mínimos para as quatro localizações

Relativamente aos gráficos da altura significativa de onda, Hs, em anexo, permitiu-se concluir que:

- Para a localização n.º 1, o valor máximo registado é de 6.94 m, a 28 de Dezembro de 1981, tendo registado o valor da intensidade energética de 2712.5 $m^2.h$. A duração do temporal é de 90 horas, aproximadamente 3.5 dias;

- Para a localização n.º 6 foi registado o valor de $Hs_{m\acute{a}x}$ de 7.53 m, com o valor de Intensidade média de 3974.34 m^2h . A data de ocorrência foi a 2 Janeiro de 1970 e este temporal teve a duração de 138 horas, o que dá aproximadamente 5.5 dias;
- Para a localização n.º 15, o valor de Hs_{max} registado o valor de 6.15 m, para a data de 19 de Dezembro de 2000, com o valor médio de intensidade de 970.37 m^2h . A duração deste temporal durou 48 horas, que corresponde a 2 dias.
- Na localização n.º 21 o maior valor de Hs registado é de 5.85 m, com o valor de intensidade energética média de 831.33 m^2h . Este evento ocorreu em 19 de Dezembro de 2000, com a duração de 48 horas.

Para os gráficos em anexo referentes ao período de pico, são observadas as seguintes características:

- Para a localização n.º 1, o período de pico máximo registado é 22.01 s para a data de 13 de Abril de 2003, com o valor de intensidade energética de 794.11 m^2h . O evento teve a duração de 30 horas.
- Para a localização n.º 6, o período de pico máximo registado é 21.91 s para a data de 13 de Abril de 2003, com o valor de intensidade energética média de 1333.7 m^2h . O evento teve a duração de 48 horas, que corresponde a 2 dias.
- Para a localização n.º 15 o período de pico máximo é 19.87 s para a data de 7 de Novembro de 2003 com o valor de intensidade média de 87.3 m^2h . Este temporal foi curto, tendo a duração de 6 horas.
- Para a localização n.º 21 o valor máximo registado foi 17.79 s para a data de 7 de Novembro de 2003. Foi registado o valor de intensidade média de 65.93 m^2h e teve uma duração de 6 horas.

Verifica-se que os valores máximos do período de pico em temporal foram registados para o mesmo evento nas duas localizações mais a Oeste e para um mesmo outro evento nas duas localizações mais a Este. Os dois eventos de temporal, embora tenham ocorrido no mesmo ano, são distintos.

Verifica-se que há também um decréscimo dos valores de período de pico no sentido de Oeste para Este.

Relativamente aos gráficos da direção de ondulação, verifica-se que:

- Para a localização n.º 1, a direção mínima registada é 173º e a direção máxima é 245º. A gama de direções mais frequentes é entre 200º e 250º;
- Para a localização n.º 6 as direções estão compreendidas entre 172º e os 250º. A gama de direções mais frequentes é entre 210 e 250º;
- Para a localização n.º 15 são verificadas direções entre, aproximadamente, os 140º e os 200º;

- Na localização n.º 21 foram registados valores de direcção entre 120º e 193º, mais frequentes na gama entre 120º e 180º.

Relativamente às localizações mais ocidentais (1 e 6), a gama das direcções médias da agitação marítima durante períodos de tempestade é muito semelhante e relativamente frontal à costa, perpendicular aproximadamente à direcção 220º. No sector nascente (localizações 15 e 21), perpendicular aproximadamente à direcção 140º, as direcções de ondulação mais frequentes são perpendiculares à costa ou sensivelmente mais próximas do sul, sendo no entanto maiores na localização n.º 15 do que no n.º 21. Ou seja, no sector nascente, quanto mais próxima é a localização do Cabo de Santa Maria, mais rodada para sul ou sudoeste-oeste serão as direcções da agitação marítima de temporais.

3.2.3. RESULTADOS DA INTENSIDADE ENERGÉTICA

Através das Figura 3.19 e Figura 3.20 é possível observar os valores da Intensidade energética média, determinada pelo método de Heitor (2013), eq. (2.1), para a faixa litoral Algarvia aqui estudada. Como seria de esperar pelos resultados acima apresentados, constata-se menores valores de I_s nos pontos localizados mais a Este e maiores valores de I_s mais a Oeste. A zona a Oeste é a mais energética do caso de estudo. Este facto está relacionado com a orientação da costa e por estar mais próxima aos efeitos de agitação provenientes do Oceano Atlântico.

Relativamente aos valores médios de Intensidade Energética, a localização n.º 6 apresenta o maior valor registado de I_s , com 489 m^2h e a localização n.º 16 o valor mínimo de 153 m^2h . Os resultados obtidos permitem depreender que existem três zonas características da costa, relativamente à intensidade energética média: da localização n.º 1 à localização n.º 6 apresenta-se a zona mais energética; da localização n.º 7 à n.º 13 ocorre um decréscimo contínuo de energia; e da localização n.º 14 à n.º 21 o seu valor volta a estabilizar. A localização n.º 6 é o ponto mais energético e a localização n.º 16 é o ponto menos energético.

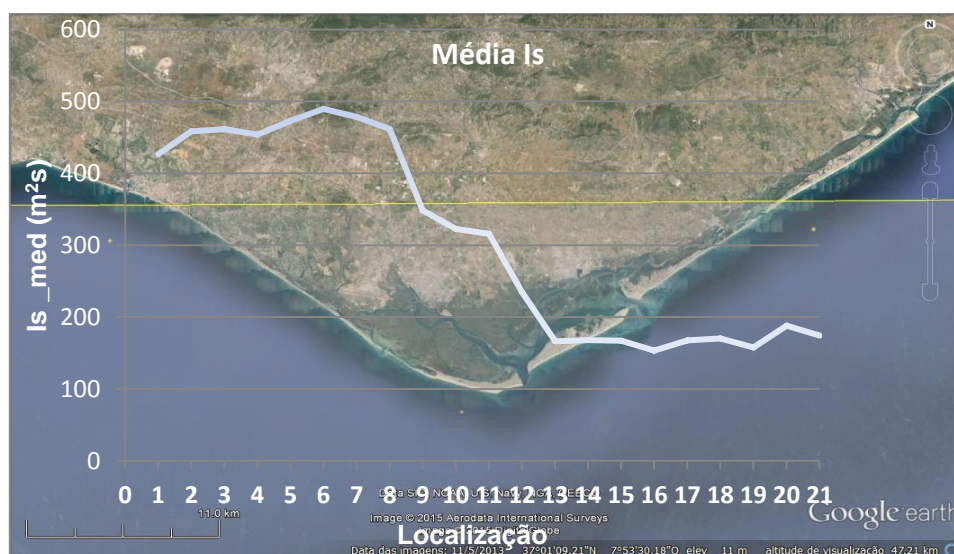


Figura 3.19 – Ilustração da Intensidade média ao longo da costa Algarvia

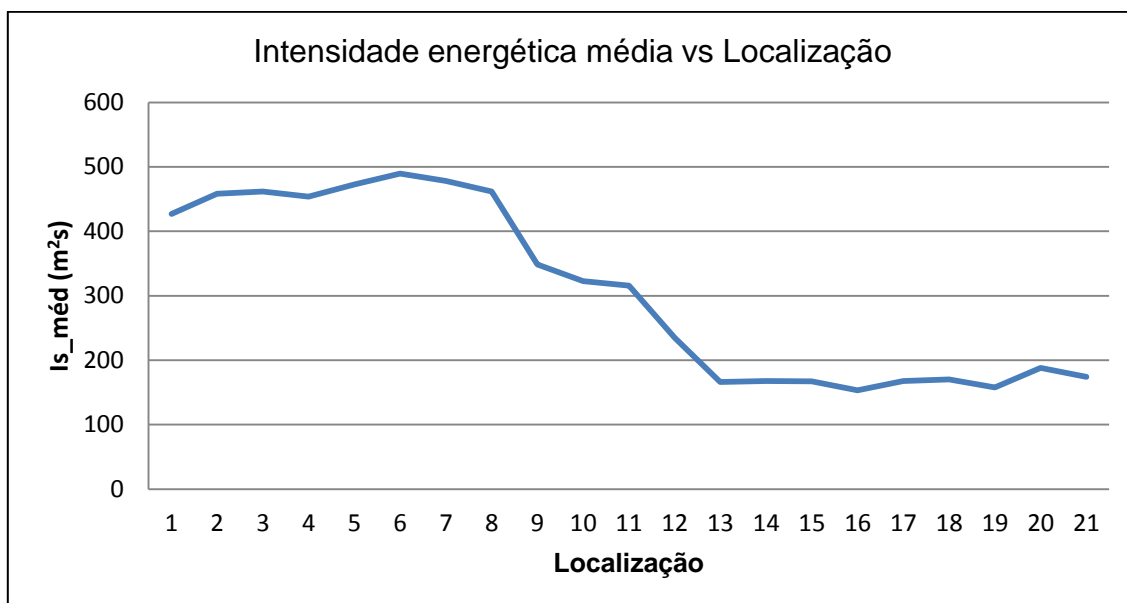


Figura 3.20 – Intensidade energética por localização

A Figura 3.21 representa os valores do período de pico para cada localização. Verifica-se que o valor máximo é 14.27 s na localização n.º 6 e o valor mínimo ocorre na localização n.º 21, com 10.88 s. Os valores de T_p aumentam ligeiramente até à localização n.º 6, e a partir desta localização para leste, há um decréscimo contínuo de T_p . Da localização n.º 1 à localização n.º 8 os valores registam-se na ordem de 14 s e a partir da localização n.º 15 os valores ficam abaixo dos 12 s. Assim, como para a intensidade energética, os maiores valores do período de pico observam-se nas localizações mais a Oeste.

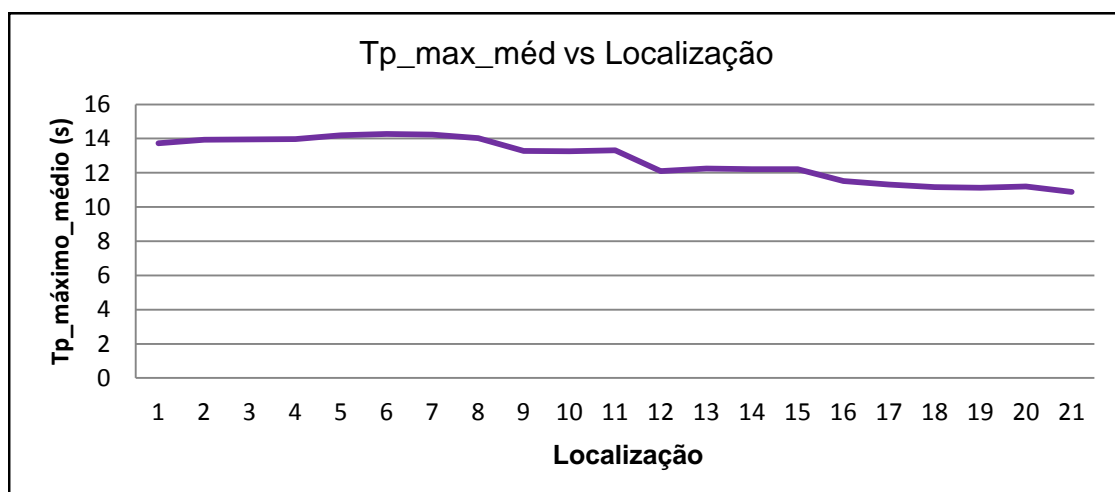


Figura 3.21 – Período de pico máximo para cada localização

A partir da Figura 3.22 é possível verificar as médias dos valores de H_s_{max} e $H_s_{méd}$, por localização, para os períodos de temporal que ocorreram nos 55 anos decorridos entre janeiro de

1958 e fevereiro de 2013. Relativamente ao parâmetro $Hs_{m\acute{a}x}$, os valores estão compreendidos entre 3.98 m, na localização n.º 6, e 3.33 m, na localização n.º 16. Para o parâmetro $Hs_{m\acute{e}d}$, os valores estão compreendidos entre 3.55 m, na localização n.º 6, e 3.24 m na localização n.º 16. Observando o gráfico verifica-se maiores valores de Hs_{max} e Hs_{med} nas localizações mais a Oeste e menores valores a Este. Verifica-se também uma regularidade nos valores até à localização n.º 6 e um padrão de decréscimo e irregularidade entre as localizações n.º 6 e n.º 16. Os valores voltam a estabilizar a partir da localização n.º 17.

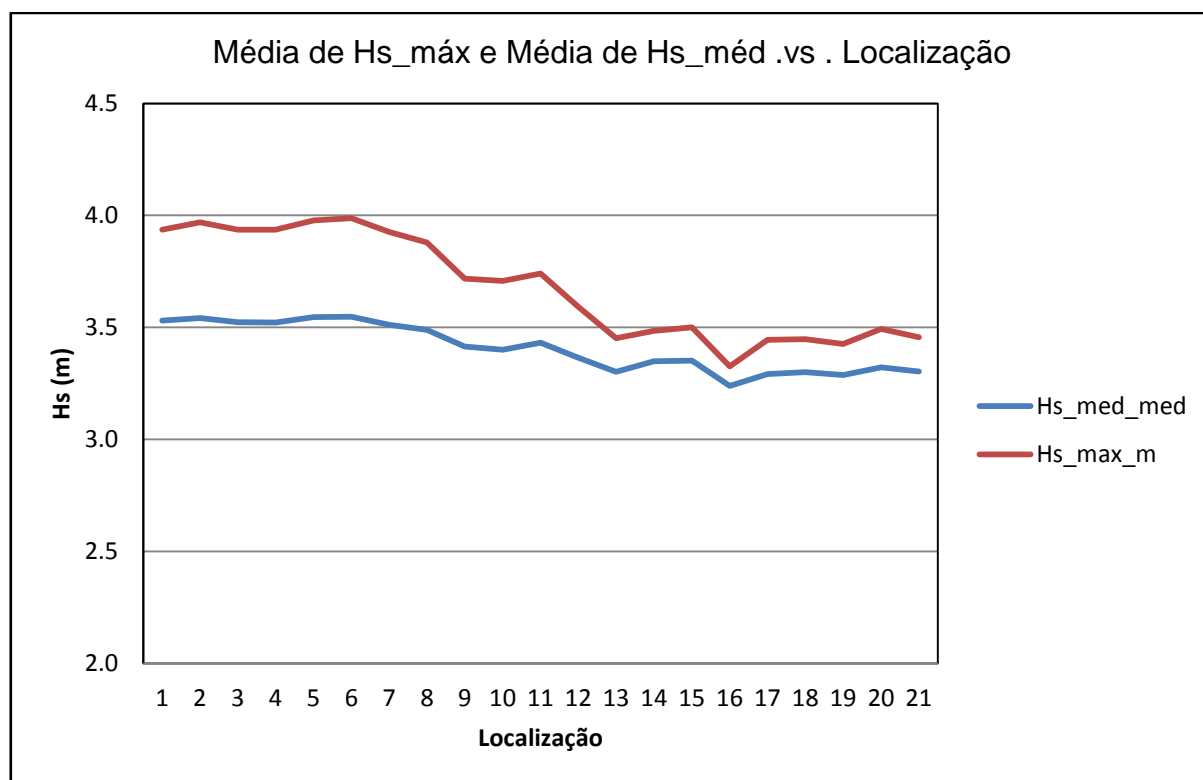


Figura 3.22 – Valores de Hs_{max} e Hs_{med} por localização

A partir das Figura 3.19 e Figura 3.20 conclui-se que as localizações mais energética e menos energética, respetivamente, são a localização n.º 6 e a localização n.º 16. Verifica-se ainda que são os pontos onde se verificam, respetivamente, os valores máximo e mínimo do período de pico médio e as alturas significativas de onda máximas e médias.

A Figura 3.23 mostra valores médios da direção média de todos os temporais, em cada localização do caso de estudo, com as respectivas gamas de valores (entre, mais e menos, um desvio padrão). Quanto à média em 55 anos, das direções médias (em temporal) da onda, registam-se valores entre 234° e 148° , respetivamente, para as localizações n.º 7 e n.º 21. Mais uma vez, verifica-se uma diferença significativa entre os pontos orientados nas direções NW-SE (a ponte) e NE-SW (a nascente): para os pontos da costa com a orientação NW-SE (até à localização n.º 11) a média destes valores rondam os 224° e a Este da zona de estudo, a média é de 195° para os pontos da costa com Orientação NE-SW.

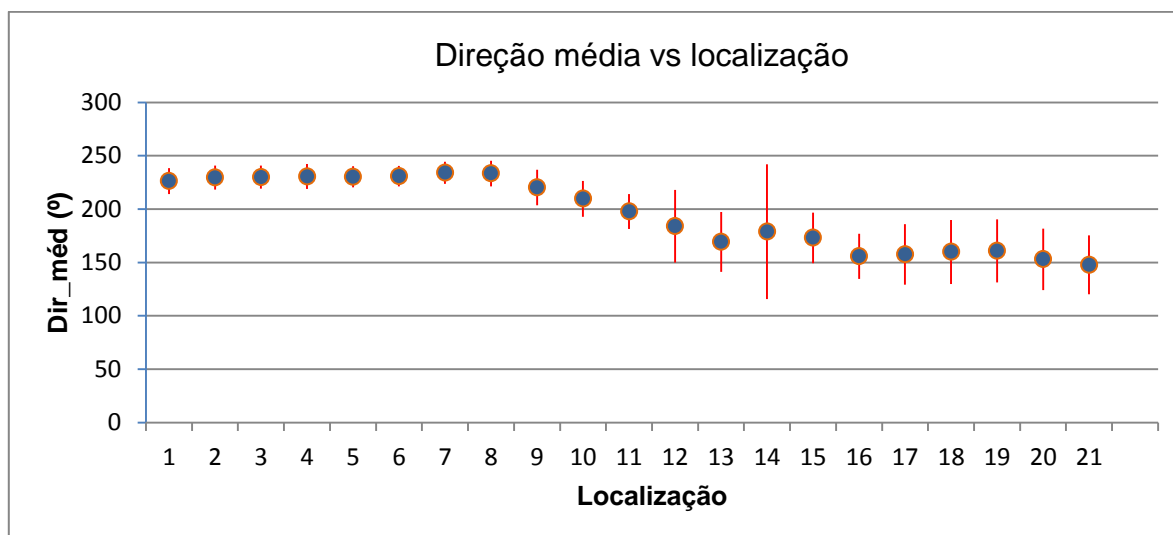


Figura 3.23 – Direção média do total de eventos de temporal em relação à localização

A Tabela 3.7 mostra os valores das intensidades energéticas médias obtidas para cada localização, no período total de 55 anos, para o caso de estudo. Na mesma tabela, conjuntamente com a Figura 3.24, são apresentados ainda a média do número de temporais por ano, para cada localização: cerca de 4.4 temporais/ano para a localização n.º 8 e 0.6 temporais/ano para a localização 21. Mais uma vez regista-se que a zona com maior número de temporais por ano está a Oeste. Regista-se também, à semelhança da Figura 3.20, que existe um padrão na variação do número de temporais por ano, podendo definir-se três zonas: a zona a Oeste com maior frequência média de temporais anuais; a zona intermédia a partir da localização n.º 8, em que os valores decrescem consideravelmente até à localização n.º 13; e a zona leste a partir da localização 14, com menos de um temporal por ano.

Ainda na Tabela 3.7, pode-se encontrar a distribuição por localização das classes de temporal, em percentagem. Para tal, aplicou-se a classificação proposta por Mendonza e Jimenez (2011) e apresentada na Tabela 2.1. A Figura 3.25 mostra graficamente os mesmos resultados. Verifica-se que a maior percentagem de eventos de temporal regista-se na classe Fraca, com um valor médio de 50% na zona Oeste do caso de estudo e de 80% na zona Este. A classe Moderada regista uma percentagem média de 20% de temporais para a zona Oeste, e de cerca de 10% para a zona Este. Em seguida, com intensidades crescentes, vêm as classes Significativa, Severa e Extrema, com percentagens relativas próximas e na ordem de 10% para a zona Oeste e entre 0% e 5% na zona Este. A classe Extrema não se regista neste sector Este.

Localização	Is_méd (m ² h)	Classes de Tempestade					nº Tempestades /Ano
		Fraca	Moderada	Significativa	Severa	Extrema	
1	426.806	0.509	0.231	0.081	0.092	0.087	2.84
2	458.382	0.538	0.181	0.104	0.086	0.090	3.62
3	461.580	0.530	0.183	0.113	0.087	0.087	3.77
4	454.004	0.529	0.202	0.099	0.085	0.085	3.66
5	472.884	0.522	0.194	0.103	0.091	0.091	3.80
6	489.374	0.506	0.198	0.103	0.111	0.083	4.15
7	478.337	0.502	0.220	0.077	0.124	0.077	4.25
8	461.488	0.507	0.202	0.099	0.114	0.077	4.46
9	348.399	0.592	0.201	0.076	0.076	0.054	3.02
10	322.759	0.573	0.221	0.099	0.061	0.046	2.15
11	315.730	0.570	0.227	0.086	0.063	0.055	2.10
12	234.859	0.646	0.266	0.051	0.038	0.000	1.30
13	166.216	0.833	0.100	0.050	0.017	0.000	0.98
14	167.850	0.797	0.136	0.051	0.017	0.000	0.97
15	167.280	0.833	0.111	0.037	0.019	0.000	0.89
16	153.428	0.841	0.136	0.023	0.000	0.000	0.72
17	167.709	0.821	0.128	0.026	0.026	0.000	0.64
18	170.390	0.800	0.125	0.050	0.025	0.000	0.66
19	157.783	0.850	0.075	0.050	0.025	0.000	0.66
20	187.930	0.795	0.159	0.000	0.045	0.000	0.72
21	174.371	0.838	0.108	0.027	0.027	0.000	0.61

Tabela 3.7 – Apresentação das classes de temporal, das intensidades médias e do número de temporais/ano, para cada localização

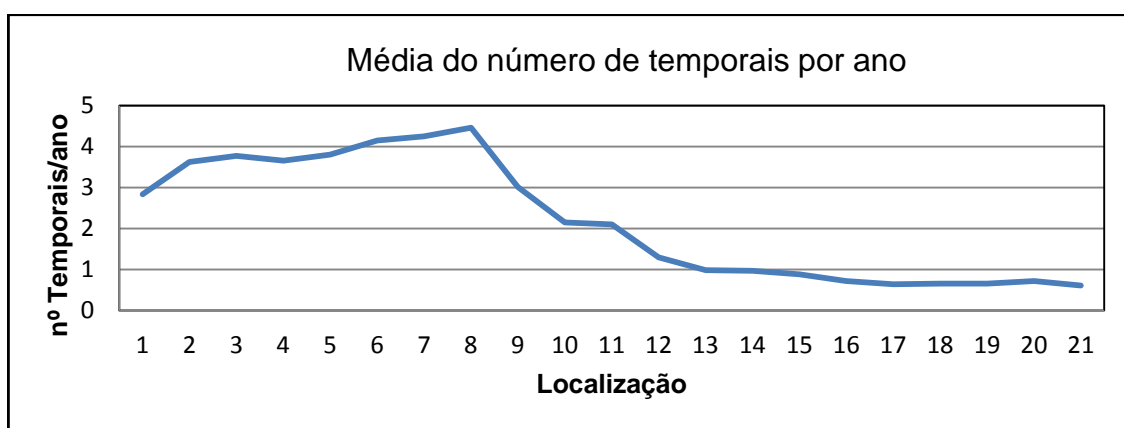


Figura 3.24 – Número de temporais/ano, para cada localização

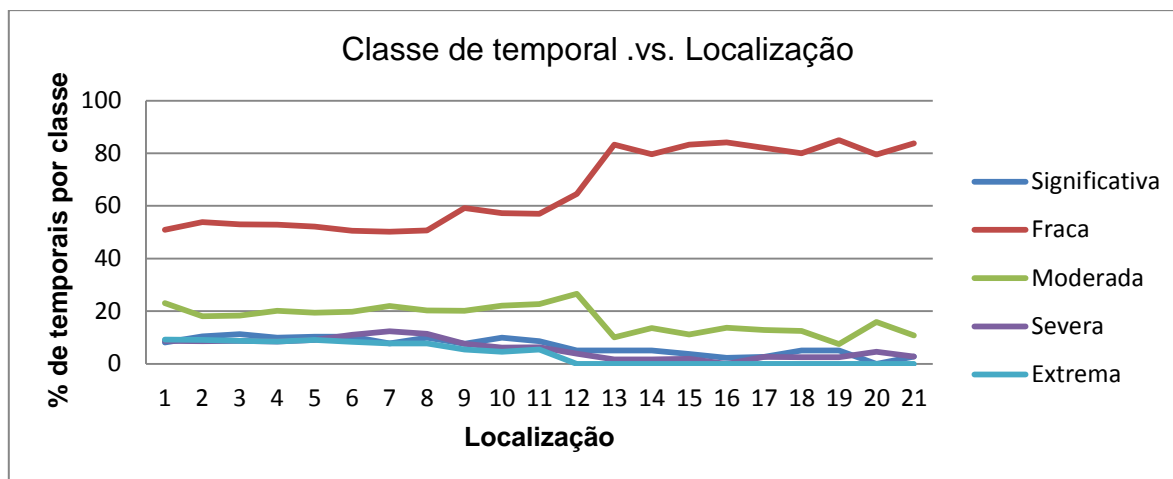


Figura 3.25 – Classes de temporal em função da localização

A Figura 3.26 mostra a distribuição de dados de altura de onda significativa em relação à duração do temporal por classe de temporal, para a localização da boia n.º13. Verifica-se através deste gráfico, que para eventos de menor duração, obtém-se valores de $Hs_{máx}$ menores, enquanto que são obtidos valores de $Hs_{máx}$ maiores para evento de temporal de maior duração. A distribuição de temporal por classes permite verificar, assim como na figura 3.24, que a maior taxa de eventos de temporal pertence à classe Fraca, com uma ocorrência de 50 temporais. A distribuição de eventos pelas cinco classes energéticas, permite verificar ainda que para a classe fraca, ou seja, com valores de intensidade energética, E , de $250 \text{ m}^2\text{h}$, os valores de $Hs_{máx}$ rondam os 3 metros e que a duração é de 6 horas ou de 12 horas para alturas de onda 3.20 metros, sendo que os eventos não ultrapassando as 24 horas. Para a distribuição de classe Moderada, com o limite de classificação energética entre $250 \text{ m}^2\text{h}$ e $500 \text{ m}^2\text{h}$, num total de 6 eventos de temporal, os valores sobem para alturas de onda significativa na ordem dos 3.70 metros, com durações de temporal na ordem das 30 horas. A classificação de temporal Significativa apresenta três eventos de temporal com valores de $Hs_{máx}$ superiores a 4.10 metros e com duração máxima de 42 horas.

Ainda para a Figura 3.26, as linhas que definem as classes energéticas (250, 500, 700 e $1200 \text{ m}^2\text{h}$) foram desenvolvidas pelo desenvolvimento da equação da intensidade energética (Heitor,2013):

$$Is = \int_{t_1}^{t_2} Hs^2 dt \Leftrightarrow (t_2 - t_1) \cdot Hs^2 = E \Leftrightarrow (t_2 - t_1) = \frac{E}{Hs^2} \quad (3.2)$$

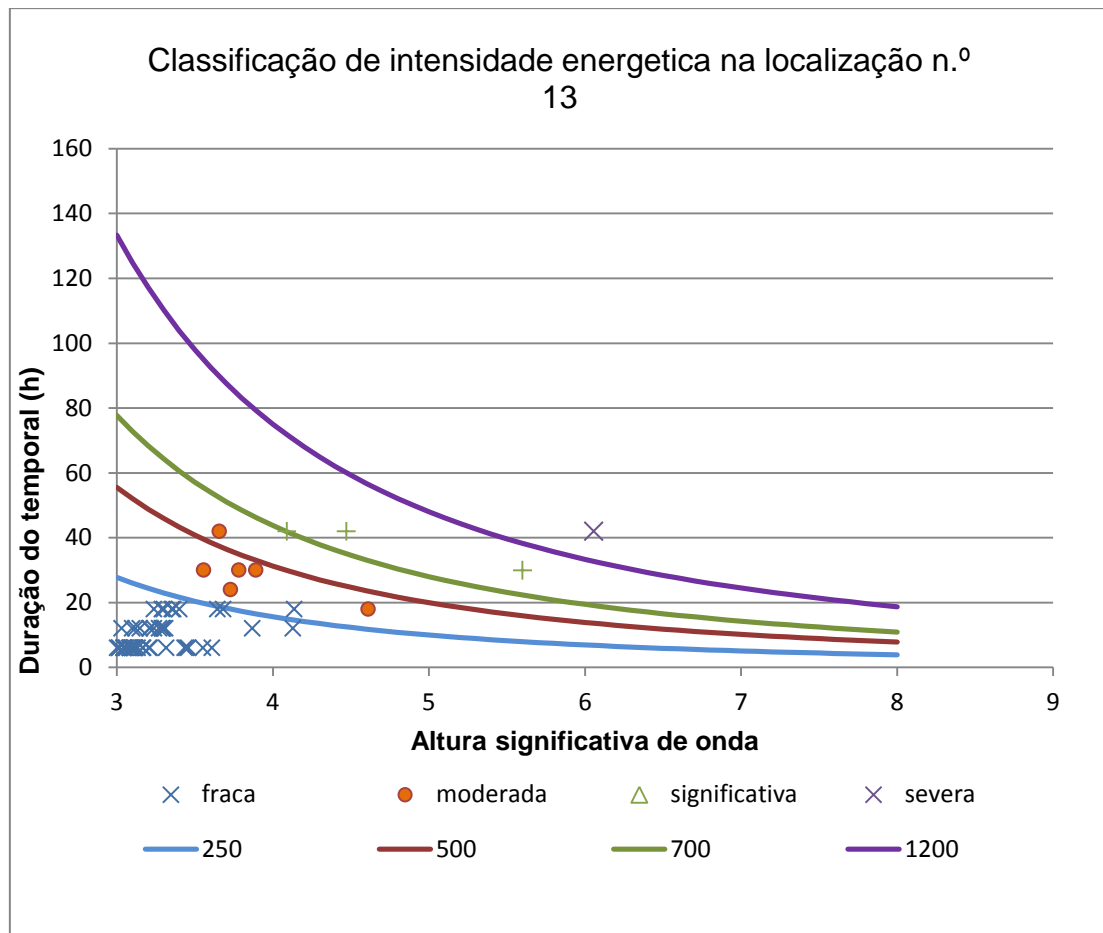


Figura 3.26 – Altura de significativa máxima .vs. duração de temporal, para cada categoria de temporal (linhas a cheio)

Os gráficos que se apresentam a seguir foram baseados em dados da localização 13. Na Figura 3.27 são analisados os valores de $H_{s_máx}$ em função da intensidade energética. É apresentada uma correlação positiva entre estes parâmetros. Verifica-se, como expectável, que os temporais de menor intensidade têm alturas significativas de onda menores. O temporal de maior duração foi de 42 horas (aproximadamente 2 dias), onde se regista também o maior valor de altura de onda significativa máxima, o valor de 6.07 m na data de 19 de Dezembro de 2000.

A Figura 3.28 ilustra a altura de onda significativa máxima em relação à duração de tempestade, para a localização n.º 13. Este gráfico apresenta, como o gráfico anterior, uma correlação positiva. Podemos ainda constatar que a maior parte dos valores de $H_{s_máx}$ estão contidos entre os 3 e 3.5 m com durações de temporal na ordem das 6 e das 12 horas.

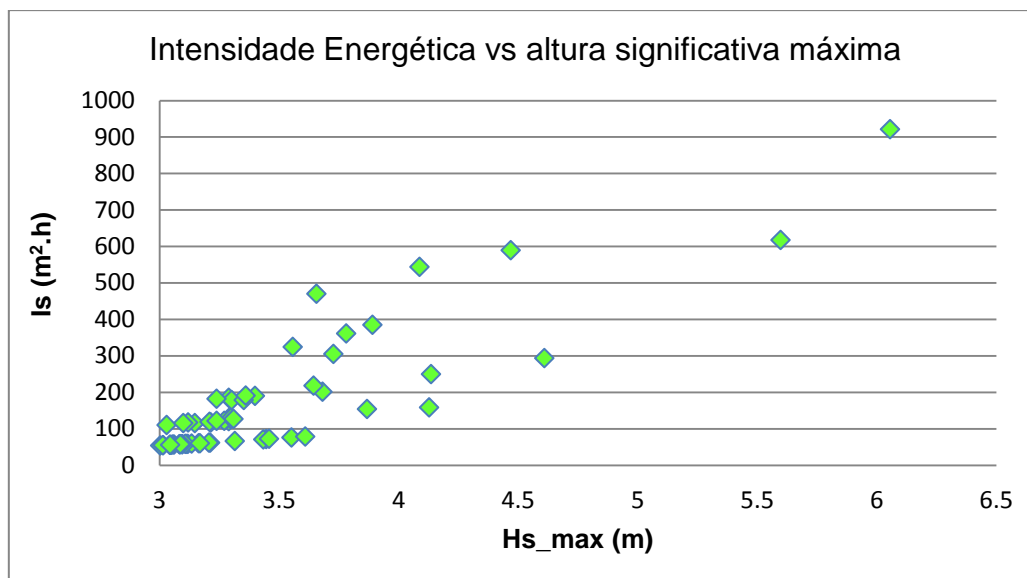


Figura 3.27 – Intensidade energética .vs. altura significativa de onda

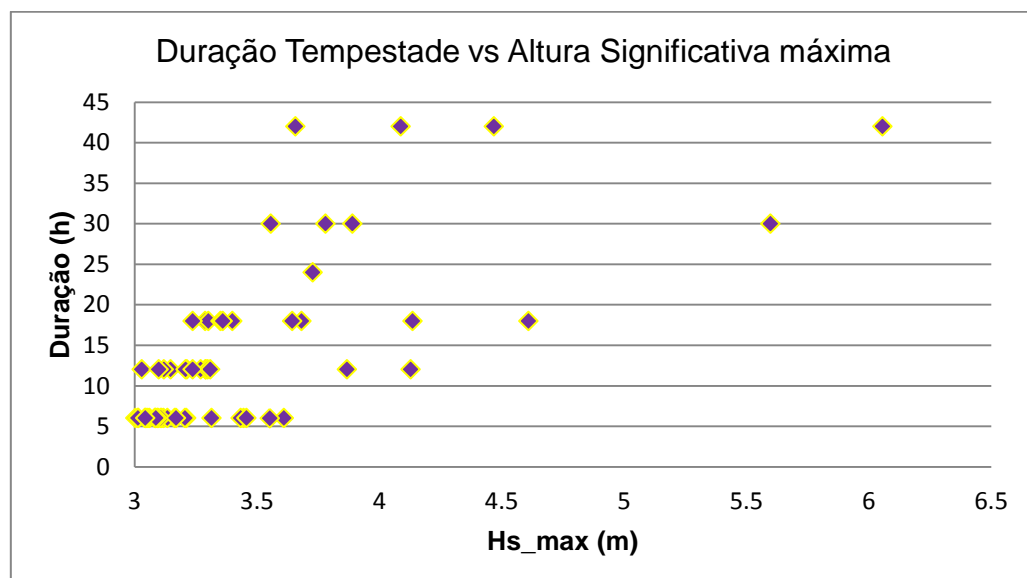


Figura 3.28 – Duração de tempestade em função da altura de onda significativa

Analogamente às duas últimas figuras, na Figura 3.29 é feita uma comparação entre a intensidade energética e a duração de temporal. Neste gráfico verifica-se que o evento com mais energia, com o valor 920 m².h, corresponde também a um dos temporais com maior duração, ocorrido a 19 de Dezembro de 2000. Assim como os gráficos anteriores, é apresentada uma correlação positiva, em que se verifica que menores valores de I_s têm curta duração de temporal.

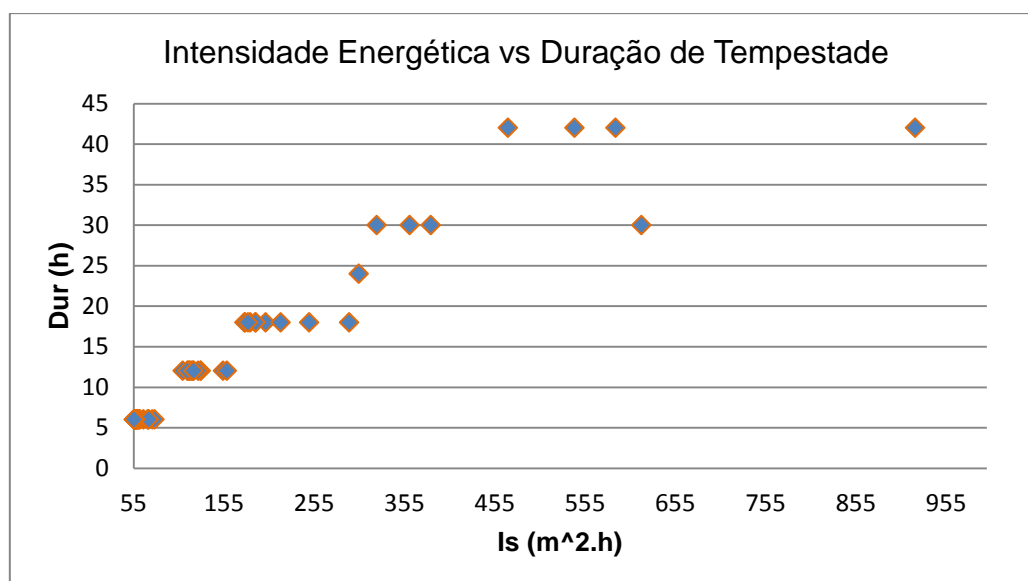


Figura 3.29 – Intensidade Energética versus duração de temporal

3.2.4. COMPARAÇÃO DOS VÁRIOS ÍNDICES

Através do programa *Is_Storm*, em MATLAB (ver 2.4), foi possível selecionar os dados de temporal e efetuar o cálculo das intensidades energéticas pelos quatro métodos: Is , Is_{Pn} , Is_{Sn} e Is_M .

As Figuras 3.30 a 3.35 apresentam os valores dos diferentes métodos de intensidade energética (abordados nesta dissertação), dois a dois, devidamente normalizados através da equação (3.1). Verifica-se assim, como para o caso de estudo de Espinho, que os melhores ajustes a uma reta linear são obtidos para os pares $Is'-Is_{Sn}'$, $Is'-Is_M'$ e no par $Is_{Sn}'-Is_M'$. Mais uma vez verifica-se que o fluxo de Energia, Is_{Pn}' , para o caso no caso de estudo do Algarve, não é o método mais adequado ao se tentar obter boas correlações com outros métodos de cálculo da intensidade marítima.

Para o primeiro caso, isto é, para a relação entre Is' e Is_S' (Figura 3.31), a maior frequência de registos encontra-se entre 0.05 e 0.2, com um bom ajuste a uma reta nessa gama de valores. Em relação aos valores extremos, os registos mínimos foram (0.059; 0.05) na data de 31 de Janeiro de 1981, um temporal com duração de 6 horas. O valor máximo ocorreu em 19 de Dezembro de 2000, com o par de valores (1;1). Este temporal teve a duração de 48 horas.

Relativamente ao par Is' e Is_M' (Figura 3.32), foi também obtida um bom ajuste a uma reta, no qual os valores máximos registados foram também registados no mesmo temporal de 19 de Dezembro de 2000, com valores (1;1). Os valores mínimos ocorreram a 31 de Janeiro de 1981, com uma duração de 6 horas e para o par (0.059;0.056).

Para o terceiro par de valores, ou seja entre Is_{Sn}' e Is_M' (Figura 3.35), os valores mínimos registaram-se igualmente na data de 31 de Janeiro de 1989, com o par de valores (0.05; 0.056) e apresenta como valores máximos (1;1), na data de 19 de Dezembro de 2000 e com duração de 48 hr.

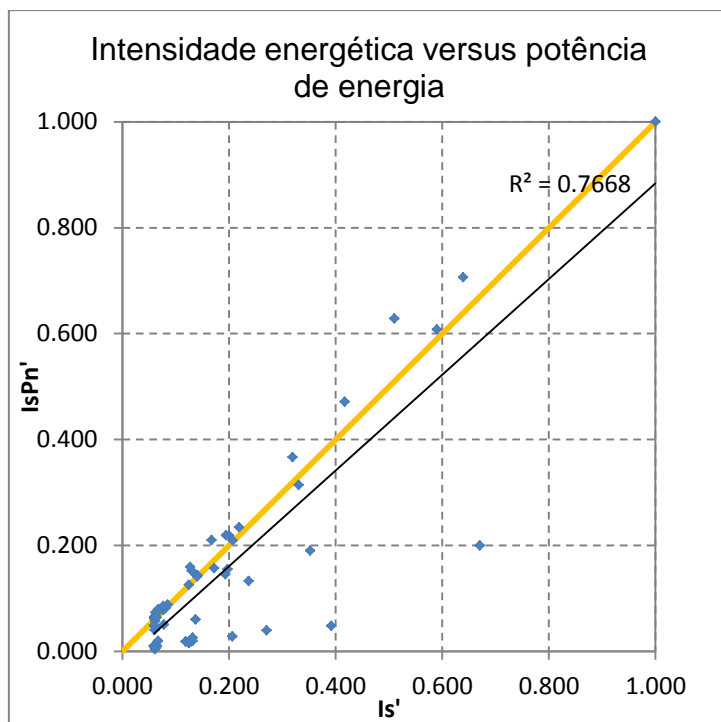


Figura 3.30 – Comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela potência da onda

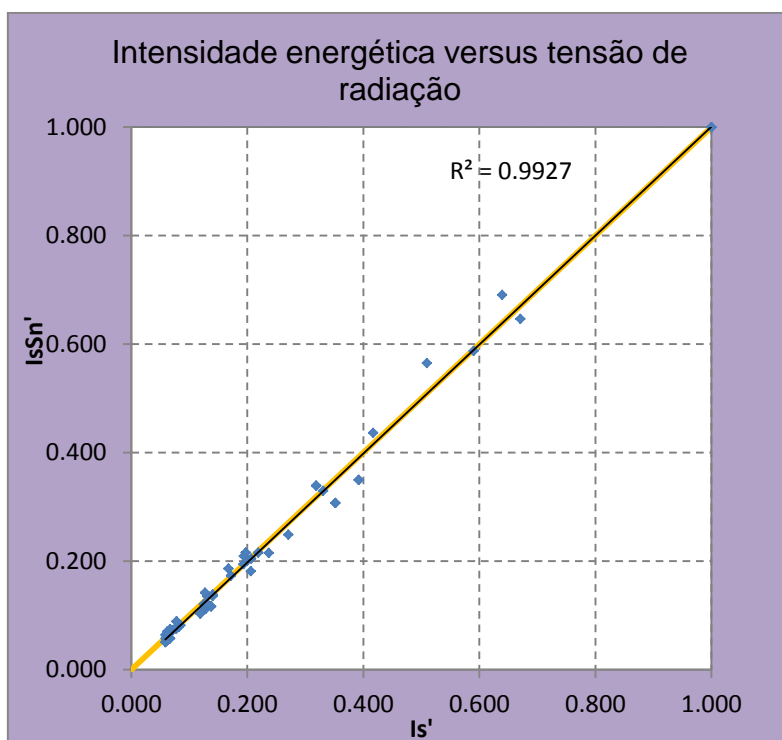


Figura 3.31 – Comparação entre intensidade energética e a intensidade pela tensão de radiação

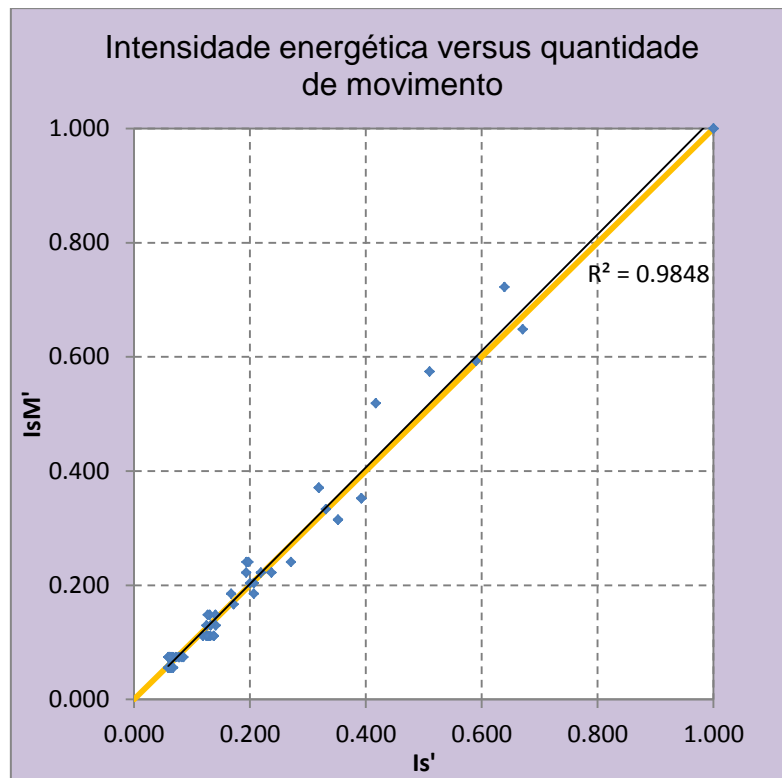


Figura 3.32 – Comparação entre a intensidade energética e a intensidade pela quantidade de movimento

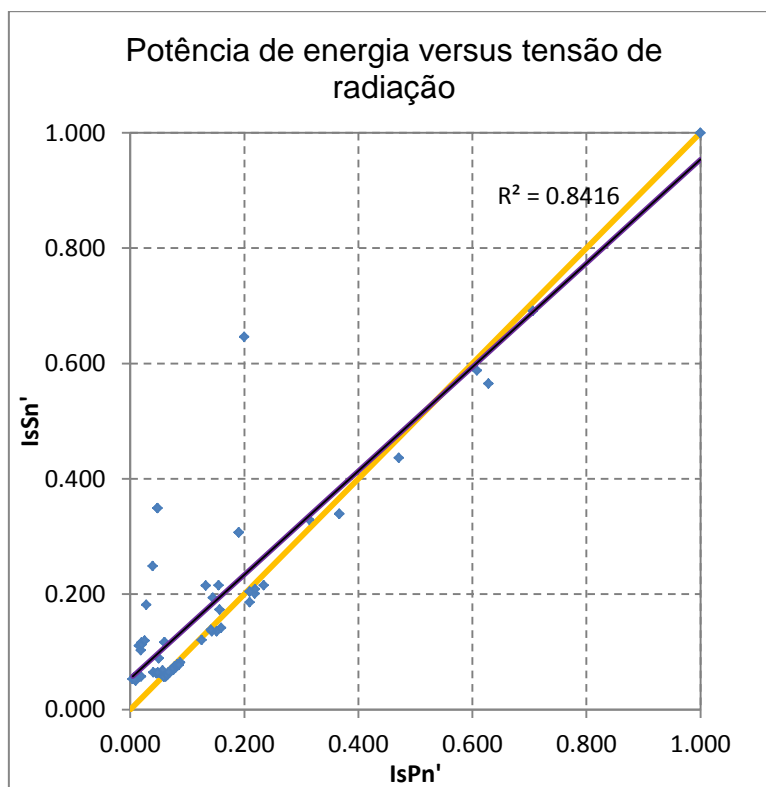


Figura 3.33 – Comparação entre a intensidade pela potência de onda e a intensidade pela tensão de radiação

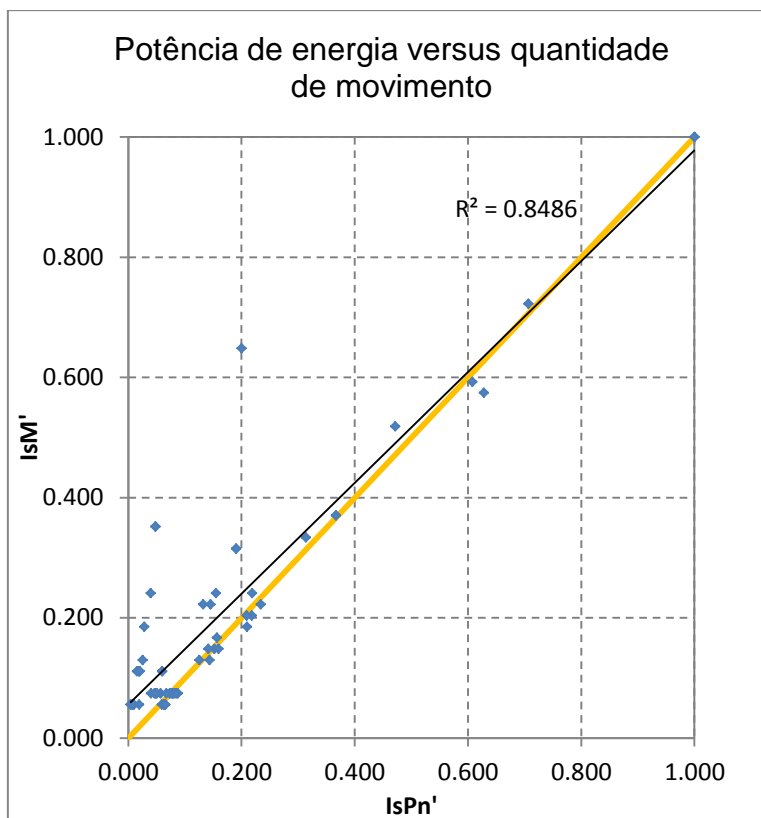


Figura 3.34 – Comparação entre a intensidade pela potência de onda e a intensidade pela quantidade de movimento

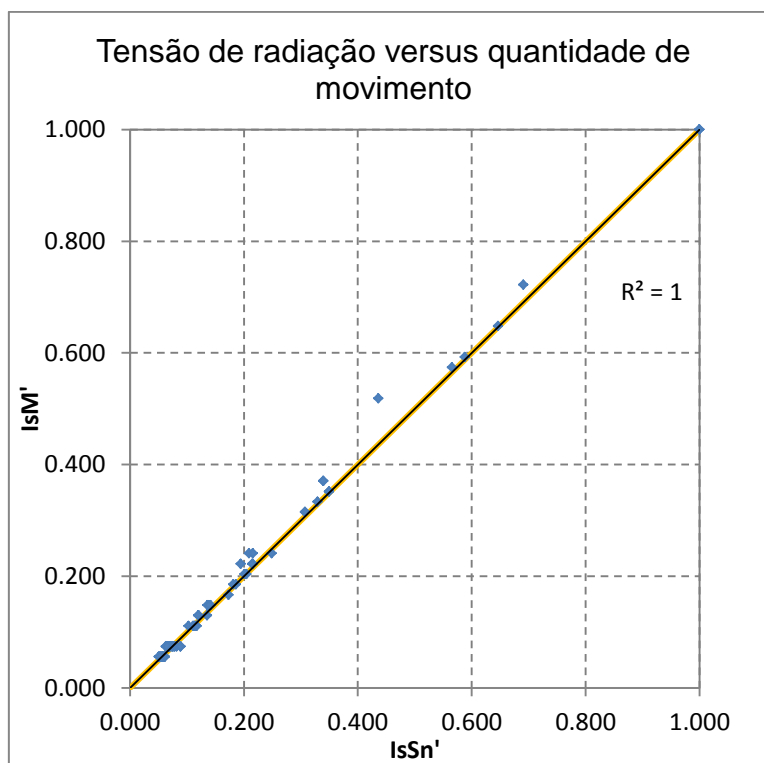


Figura 3.35 – Comparação entre a intensidade pela tensão de radiação e a intensidade pela quantidade de movimento.

A Figura 3.36 mostra os valores obtidos pelos quatro métodos de intensidade energética, devidamente adimensionalizados, para a boia 13. Tal como em Espinho, o andamento das quatro curvas é semelhante, à exceção daquela que representa Is_{Pn} .

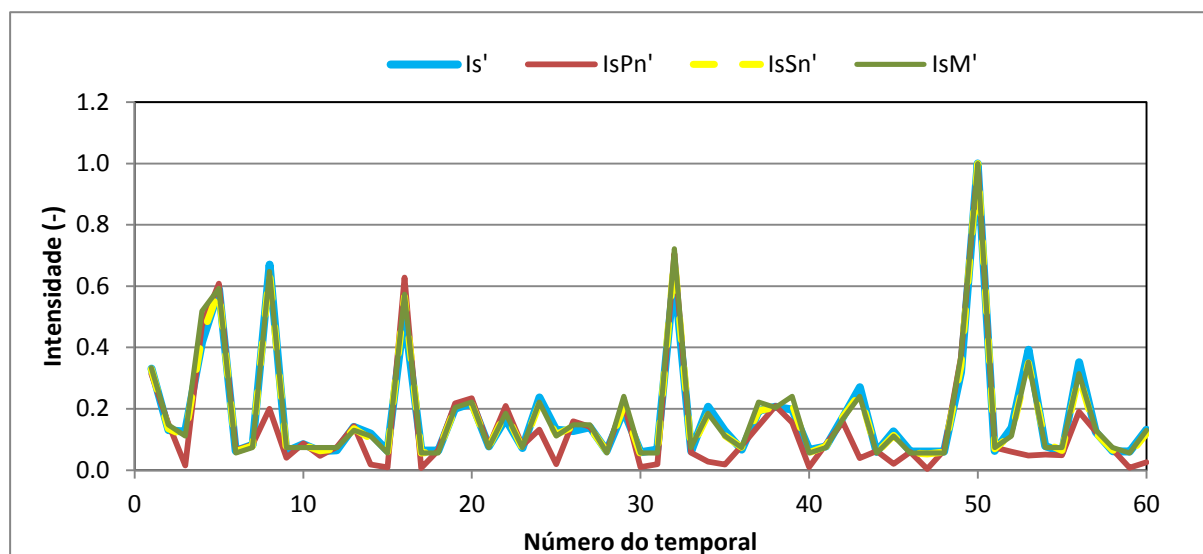


Figura 3.36 – Métodos de intensidades energéticas adimensionalizadas para os 55 anos

3.3.DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A quantificação da Intensidade Energética, conjuntamente com a avaliação de parâmetros de agitação marítima, permitem estabelecer características para a costa litoral Portuguesa. Ao se avaliar diferentes casos de estudo (que correspondem a diferentes localizações da costa portuguesa) é possível comparar valores e estimar quais os locais com maior e menor intensidade energética. A Figura 3.37 mostra a relação entre a média anual dos valores de intensidade energética para a localização intermédia (n.º 13) de ambos os casos de estudo. Para o caso de estudo de Espinho a série temporal corresponde a 56 anos e para o caso de estudo Algarvio são 55 anos. Verifica-se que a zona de Espinho apresenta um valor altamente energético relativamente a costa Algarvia. Esta diferença de valores é expectável, uma vez que Espinho está localizado na costa oeste a norte do continente português, exposta diretamente à ondulação altamente energética do Atlântico, com direção dominante de NW, originária da frente anticiclónica dos Açores e centros de baixas pressões, a oeste nas ilhas Britânicas (Costa, 2001), enquanto que a costa Sul Algarvia está direcionada para sul e não exposta diretamente às condições de agitação do Atlântico, tendo maiores registos de temporal provenientes de W-SW, resultante de depressões Atlânticas que se estendem até latitudes baixas em que as (condições apresentam direções no sentido/quadrante W/SW). Apresentam-se também registos na direção SE, provenientes da situação de anticiclones a Norte da Península Ibérica, impedindo assim a propagação para Leste das depressões provenientes do Atlântico – ou também, os denominados ventos de Levante (Costa, 2001).

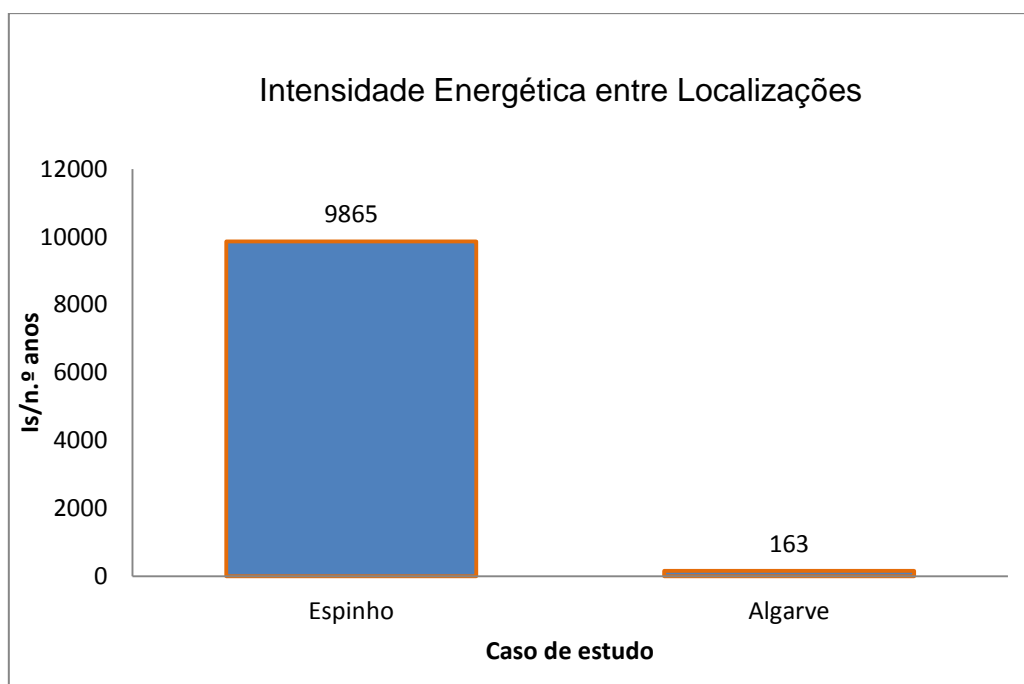


Figura 3.37 – Comparação das intensidades energéticas médias para os casos de Estudo de Espinho e Algarve

As Figuras 3.38 a 3.41 permitem comparar os quatro métodos de cálculo da intensidade energética para os dois casos de estudo abordados nesta dissertação, em valores absolutos. Os valores de intensidade energética, por qualquer dos métodos, são muito maior no caso de estudo de Espinho do que na costa Algarvia. Esta discrepância será de melhor compreensão, tendo em conta que a média de temporais anuais é de 12 para o caso de Espinho e de 2 para a costa algarvia.

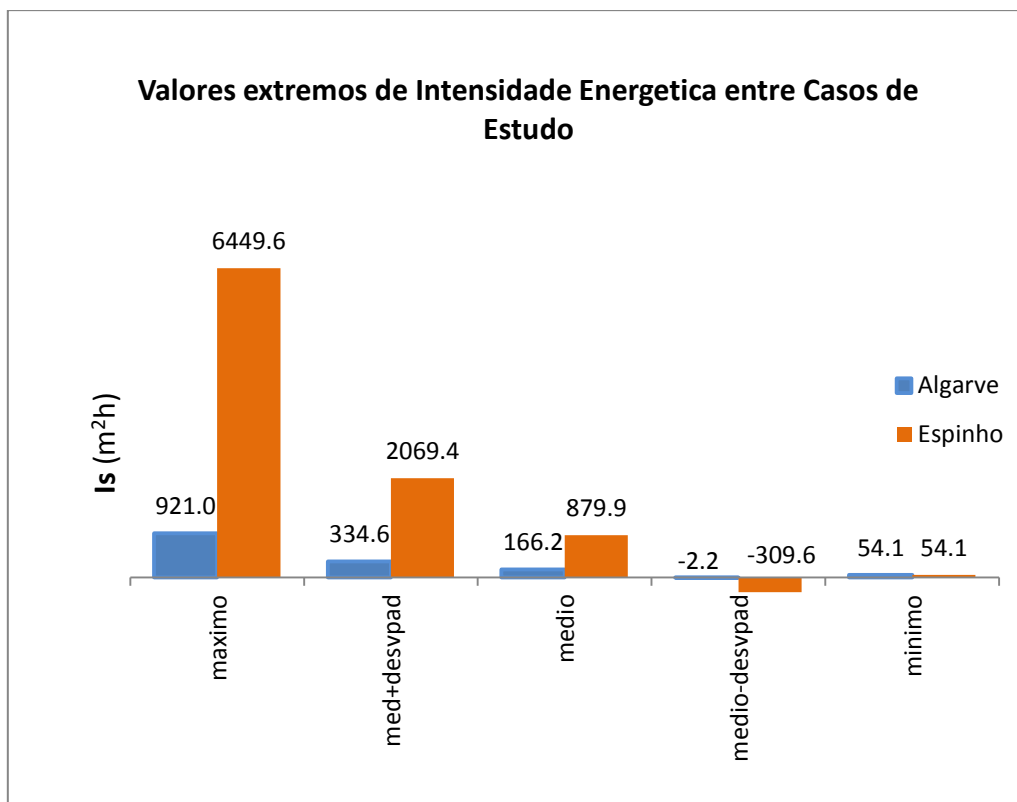


Figura 3.38 – Comparação de valores estatísticos da intensidade energética para os dois casos de estudo

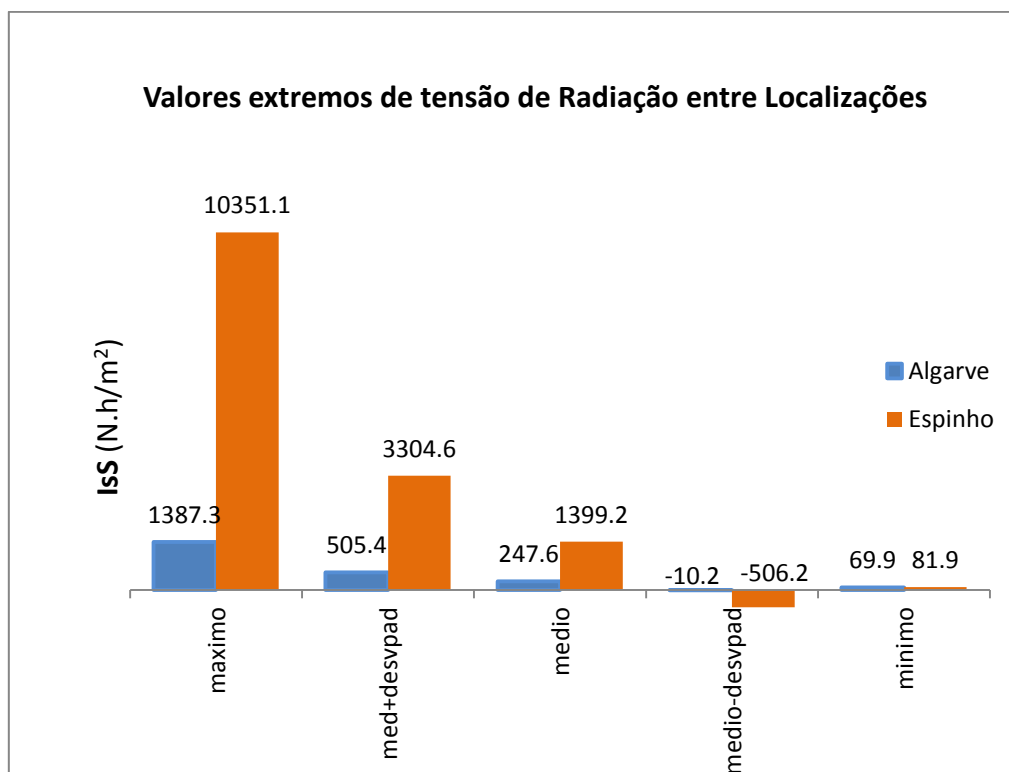


Figura 3.39 – Comparação de valores estatísticos da intensidade pela tensão de radiação para os dois casos de estudo

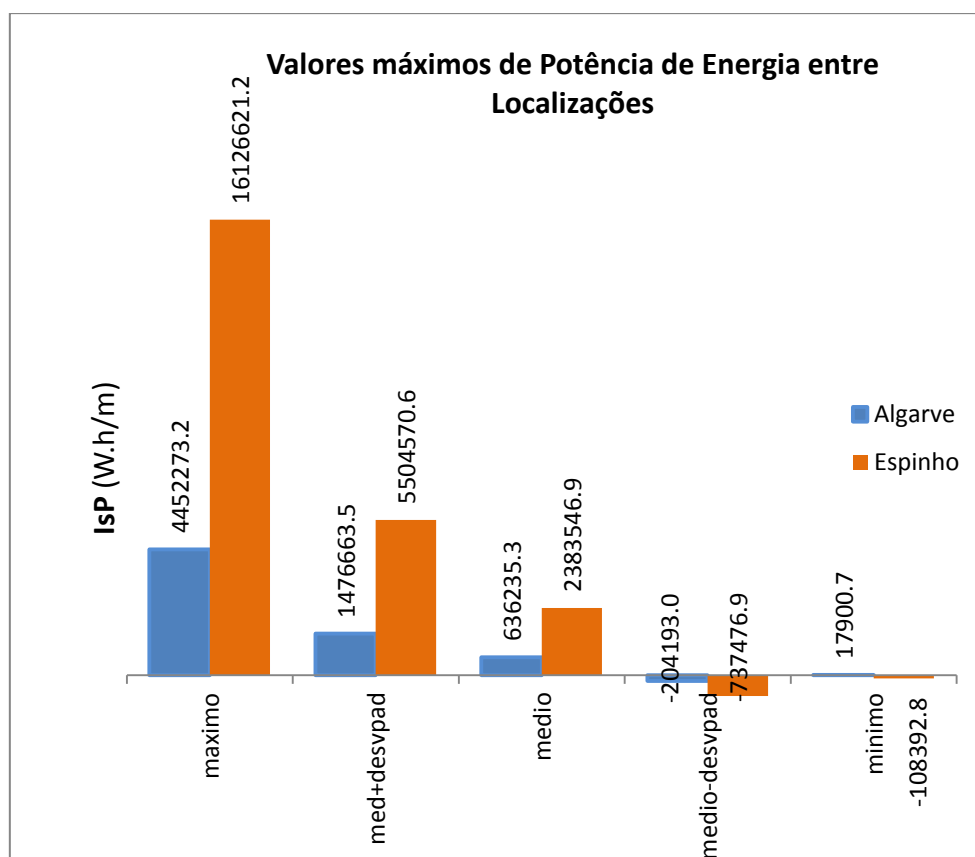


Figura 3.40 – Comparação de valores estatísticos da intensidade pela potência de onda para os dois casos de estudo

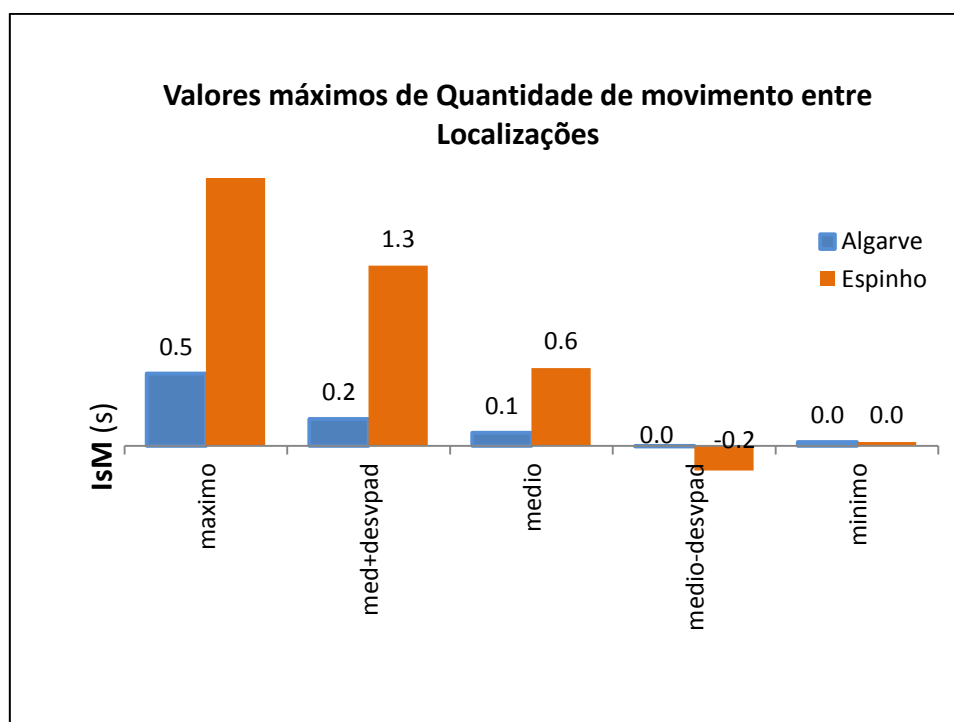


Figura 3.41 – Comparação de valores estatísticos da intensidade pela quantidade de movimento para os dois casos de estudo

É importante ainda salientar que a classificação obtida pelos quatro métodos é de seguida adaptada daquela proposta pelo método de Mendoza et al. (2011) para a intensidade energética. Para o método da tensão de radiação, que foi um dos que se obtiveram boas correlações com I_s , sugere-se um fator que permita converter as unidades da intensidade energética para as unidades da intensidade determinada pela tensão de radiação, para se utilizar a classificação de Mendoza et al. Recorreu-se assim à razão entre a intensidade energética média, $I_{s,med}$ e a intensidade pela tensão de radiação média, $I_{s,med}$, para cada um dos casos de estudo:

$$x_{Espinho} = \frac{I_{s,med}^{Espinho}}{I_{s,med}^{Espinho}} \quad (3.3)$$

$$x_{Algarve} = \frac{I_{s,med}^{Algarve}}{I_{s,med}^{Algarve}} \quad (3.4)$$

sendo $x_{Espinho}$ o fator associado ao caso de estudo de Espinho e $x_{Algarve}$ o caso de estudo associado ao Algarve. Note-se que apesar destes fatores serem dimensionais, eles permitirão para cada caso de estudo obter os limites de classes de intensidade pelo método da tensão de radiação, a partir das classes de intensidade energética atribuídas na Tabela 2.1. Efetuando estes cálculos, determinou-se $x_{Espinho} = 1,59$ e $x_{Algarve} = 1,49$, valores estes suficientemente próximos para se poder propor uma classificação única para a intensidade pelo método da tensão de radiação utilizando $x=1,5$. Os limites destas classes são assim apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Categorização de temporais através da intensidade pela tensão de radiação

Classes	$I_{s,med}$ (Nh/m ²)
Fraca	≤ 375
Moderada	$375 < I_{s,med} \leq 750$
Significativa	$750 < I_{s,med} \leq 1050$
Severa	$1050 < I_{s,med} \leq 1800$
Extrema	> 1800

4. CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação é dar continuidade à metodologia desenvolvida por Heitor (2013) e Sancho *et al.* (2013), que propuseram uma classificação da intensidade dos temporais baseada no valor da intensidade energética associada a períodos de tempestade no litoral de Espinho. Pretendeu-se nesta dissertação desenvolver essa metodologia e aplicá-la também à zona sul da costa continental Portuguesa, o que permitiu efetuar uma comparação da intensidade energética entre o caso de estudo de Espinho, na costa oeste, e o caso da Ria Formosa, na zona sul do continente português.

Assim, aplicaram-se mais três métodos para categorizar os temporais aos dois casos de estudo. Os métodos utilizados foram, além da intensidade energética, a intensidade (marítima) pela potência de onda, a intensidade pela quantidade de movimento da onda e a intensidade pela tensão de radiação.

Para obter informação que permita categorizar os temporais na costa Sul Portuguesa, no litoral da Ria Formosa, ao longo de 55 anos, foi efetuada uma propagação das condições de agitação marítima ao largo pelo modelo numérico SWAN para obtenção dos parâmetros de altura significativa de onda, H_s , direção média, Dir , e período de pico, TPs , ao longo de uma linha batimétrica de 15 m, que ronda uma extensão de 18.4 km. Este modelo foi forçado com a série de dados estimados ao largo da Ria Formosa para o período entre Janeiro de 1958 e Fevereiro de 2013.

Para a costa Oeste utilizaram-se os resultados das corridas do SWAN efetuadas por Heitor (2013), em 26 pontos distribuídos ao longo de 12,5 km, à profundidade de 15 m (ZH), paralelamente ao litoral de Espinho para o período entre Janeiro de 1953 e Março de 2009.

Da aplicação dos diferentes métodos aos dados do litoral de Espinho conclui-se que os resultados dos quatro métodos estão muito bem correlacionados, sendo as diferenças muito subtis. Não é assim possível concluir, para já, sobre a vantagem ou maior adequação de um método sobre qualquer um dos outros.

A análise de resultados provenientes do modelo numérico SWAN para a costa da Ria Formosa permite tirar algumas conclusões acerca dos parâmetros de agitação marítima. Analisando os resultados obtidos é possível verificar que:

- Os valores de intensidade energética encontram-se entre os $54 \text{ m}^2\text{h}$ e os $3974 \text{ m}^2\text{h}$, sendo que, tal como esperado, a costa a oeste do Cabo de Santa Maria é mais energética que a costa a leste.
- As direções médias de cada tempestade variam entre os 175° e os 245° , em rumos náuticos. O período de pico registou valores entre os 11 e os 14 segundos.
- Em relação aos valores máximos e médios da altura significativa de onda, foram obtidos valores na gama dos 3.3m a 4.0m e 3.2 m a 3.6 m, respetivamente.

- As localizações mais relevantes foram a zona central da costa a oeste do Cabo de Santa Maria, onde se registaram os valores máximos da intensidade energética e a zona central da costa a leste, onde se registaram os valores mínimos da intensidade energética.

Através da classificação energética verifica-se que, para o caso de Ria Formosa, a classe mais frequente é a de intensidade “Fraca”.

Como abordado em Basco e Mahmoudpour (2012), a intensidade “energética” pode ser estimada pela quantidade de movimento associada à propagação de ondas, contida num temporal, relacionada com a tensão de radiação (Huges, 2004). Através dos resultados obtidos nesta dissertação é visível que a intensidade determinada pela quantidade de movimento apresenta valores pertinentes e com ajustes bastante razoáveis, principalmente quando se compara com a intensidade energética.

Da aplicação dos diferentes métodos aos dados do litoral da Ria Formosa conclui-se que os resultados dos quatro métodos diferem entre si. Para esta costa sul, verifica-se que o método do fluxo de energia (ou da potência de onda) não é o método mais adequado, com fraca correlação com outros métodos energéticos, estando os restantes três métodos bem correlacionados. Assim, caso se pretenda representar a intensidade marítima através de um valor que tenha em atenção a obliquidade da agitação marítima em relação á costa, o método da tensão de radiação será o método mais adequado para categorizar temporais, tendo-se proposto uma classificação destes a partir da classificação existente para a intensidade energética (vide Mendoza et al., 2011, e Heitor, 2013).

Comparando as duas zonas em estudo, litoral de Espinho e da Ria Formosa, verifica-se que a zona de Espinho apresenta um valor energético médio anual, em período de tempestade, quase duas ordens de grandeza superiores ao da costa Algarvia (Figura 3.37), uma vez que não só ocorrem temporais com maiores valores energéticos, como também ocorre muito maior número médio de temporais (com $H_s > 3m$) em Espinho que na costa da Ria Formosa.

BIBLIOGRAFIA

- Alveirinho Dias, J. (1988) – “*Aspectos geológicos do litoral Algarvio*”, Vol. 10: 113-128. Geonovas, Lisboa
- Basco D., Mahmoudpour, N. (2012) - *The Modified Coastal Storm Impulse (COSI) Parameter and Quantification of Fragility Curves for Coastal Design. Coastal Engineering Proceedings*, 13 p.
- Castro – *Pesca no Litoral Rochoso Alentejano*, Centro de Oceanografia, p. 1-5. Disponível em <http://www.alentejolitoral.pt/Downloads/Ambiente/Mar%20e%20Pescas/Pesca%20litoral%20rochoso%20alentejano.pdf>
- Costa, M., Silva, R., Vitorino, J., (2001) – “*Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa Portuguesa*”, Instituto Hidrográfico, Lisboa, 20 p.
- Demirbilek, Z.; Vincent, C. – “*Water Wave Mechanics*”. Capítulo II, Part 1, p. 3-29. Disponível em: http://smos.ntou.edu.tw/reference/Coastal_Engineering_Manual_USA/manual/Part-II-Chap1,%20Water%20Wave%20Mechanics.pdf
- Gama, C., Taborda, R., Alveirinho Dias, J.M. (1997). Sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica. "COLECTÂNEA DE IDEIAS SOBRE A ZONA COSTEIRA DE PORTUGAL", Lisboa, Novembro, 1997.
- Heitor, D. S. (2013) - *Classificação da intensidade energética no litoral de Espinho. Dissertação de Mestrado em Eng. Civil -Perfil de Construção*, FCT UNL, 95 p.
- Hughes, S. A. (2004) - *Wave momentum flux parameter: a descriptor for nearshore waves*. US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory; Vicksburg (USA), 18 p.
- Liu, Z., Frigaard, P. (2001) – *Generation and Analysis of random waves*. Instituted for Vand, Aalborg Universitet.
- Mendoza, E. T., Jimenez, J. A. e Mateo, J. (2011) – A coastal Storm intensity scale for the Catalan Sea (NW Mediterranean), 11, 2453-2462. Natural Hazards and Earth System Sciences.
- Sancho, F., Heitor, D.S. e Neves, M.G. (2013) - *Intensidade energética sob temporais marítimos: proposta de metodologia e aplicação ao litoral de Espinho*. 8.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa.
- SWAN team, The (2014) - *SWAN Cycle III version 41.01*. Delft University of Technology

Vieira, J. P. - *Litoral Português – Questão de sobrevivência para Portugal*, Ingenium, Vol. 141, nº 141 (2014), p. 5.

ANEXO I

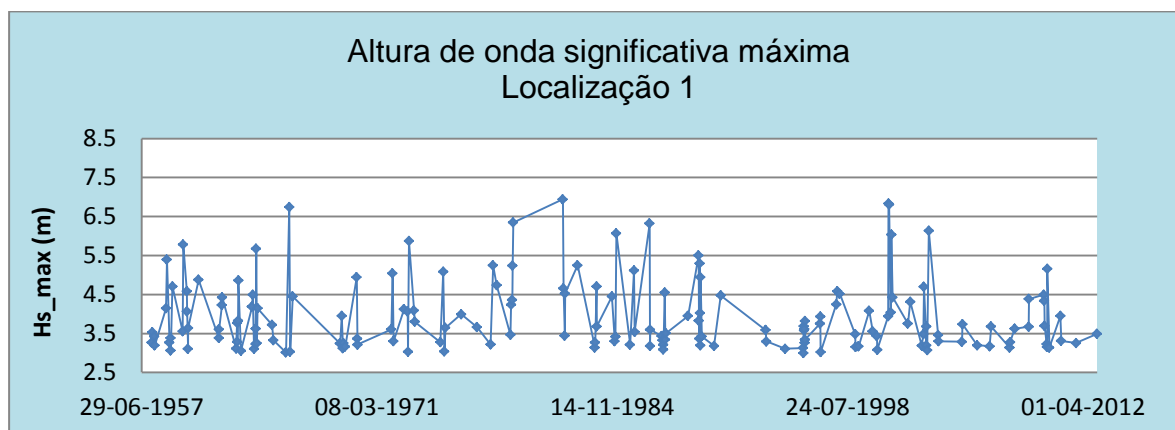


Figura I.1 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 1

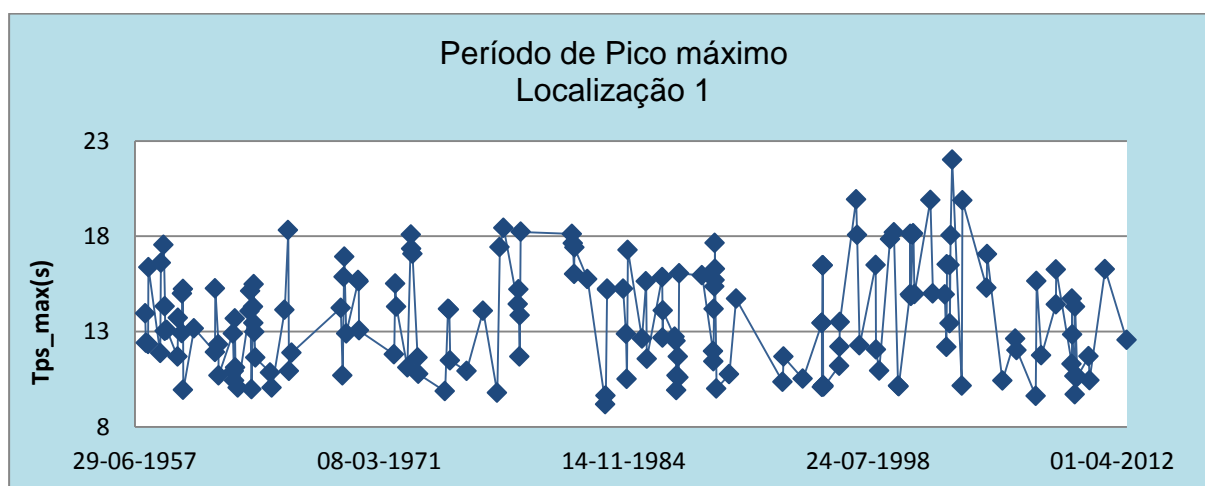


Figura I.2 – Apresentação do período de pico para a localização 1

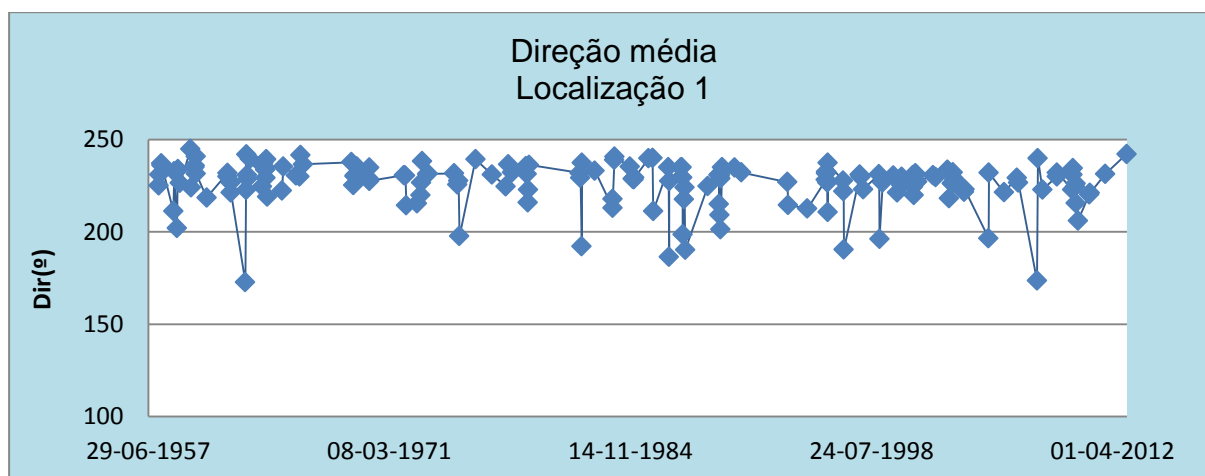


Figura I.3 – Apresentação da direção média para a localização 1

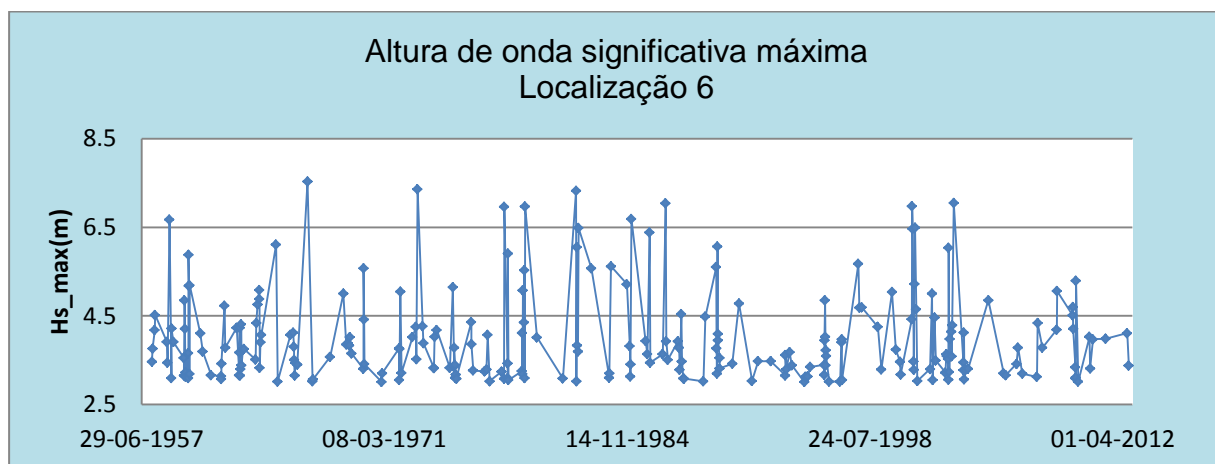


Figura I.4 – Apresentação da altura de onda singificativa para a lozalização 6

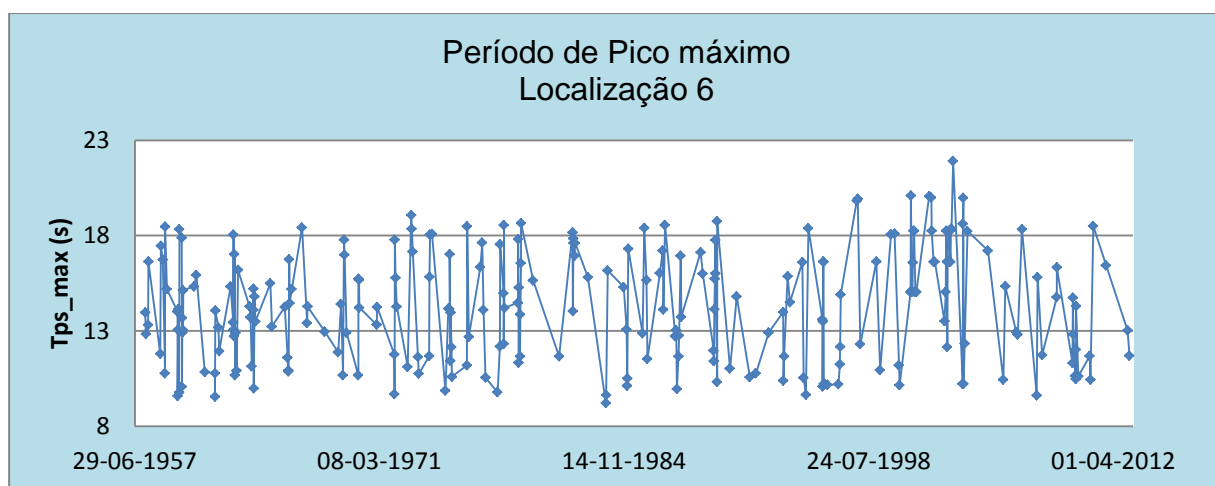


Figura I.5 – Apresentação do período de pico para a localização 6

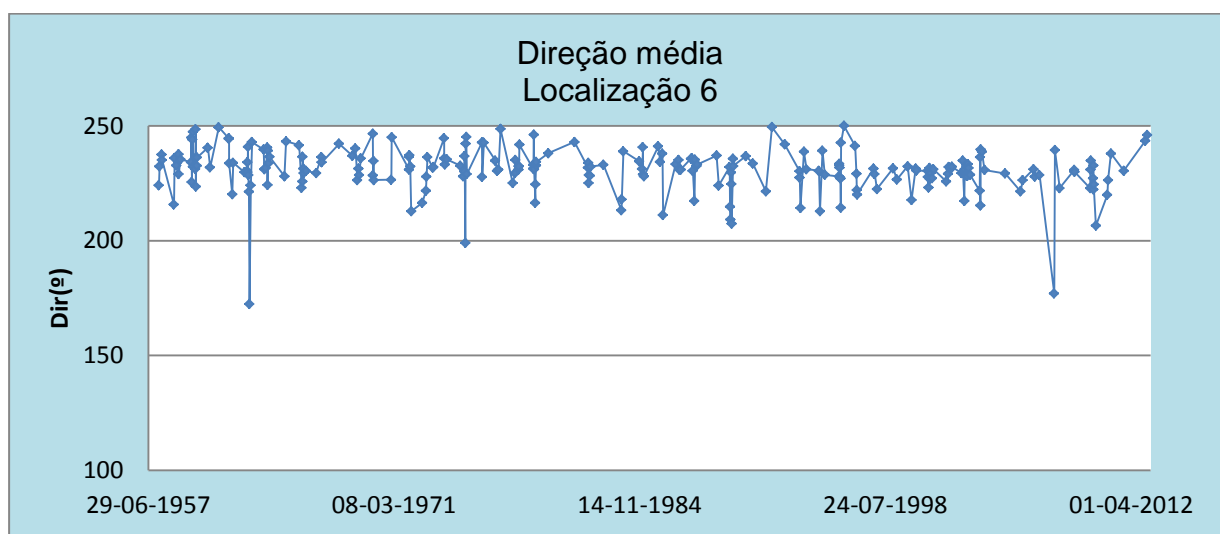


Figura I.6 – Apresentação da direção média para as localização 6

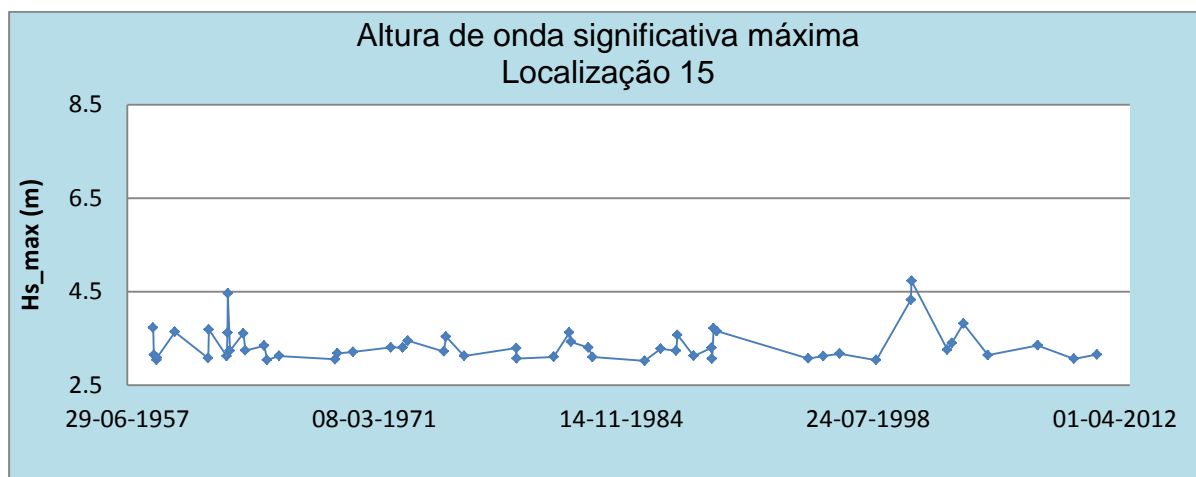


Figura I.7 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 15

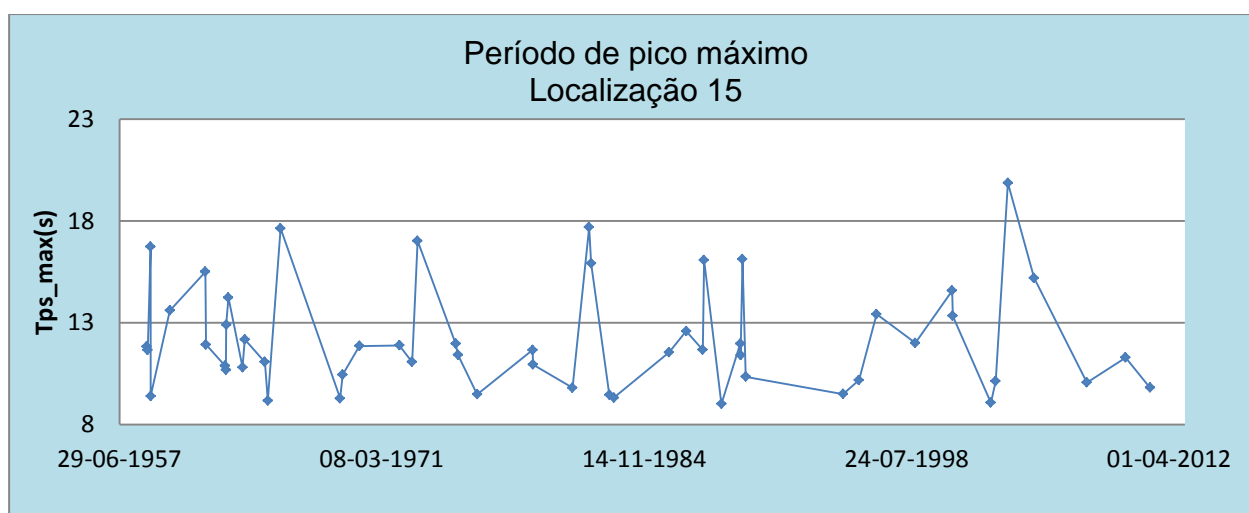


Figura I.8 – Apresentação do período de pico para a localização 15

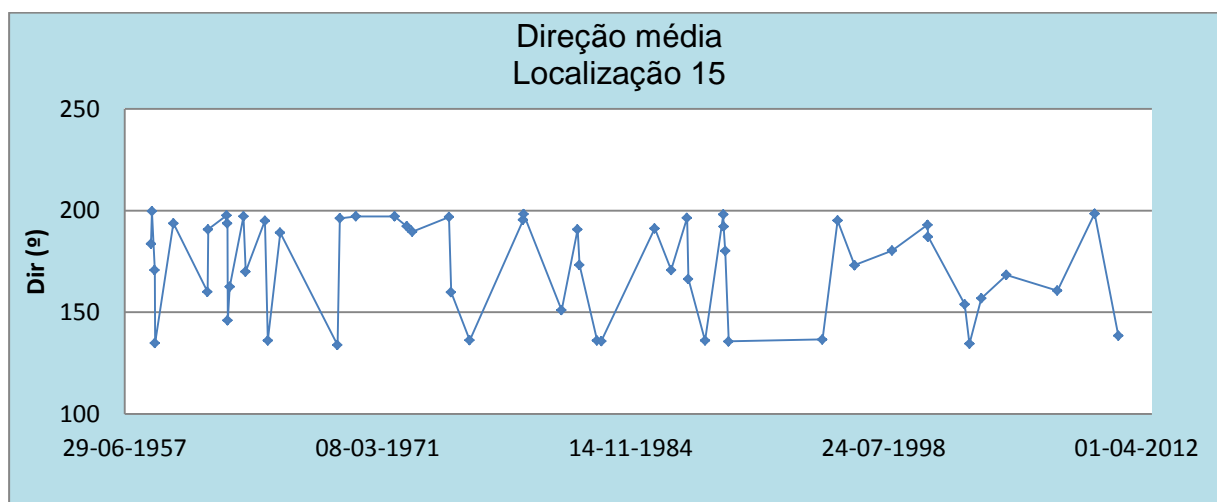


Figura I.9 – Apresentação da direção média para a localização 15

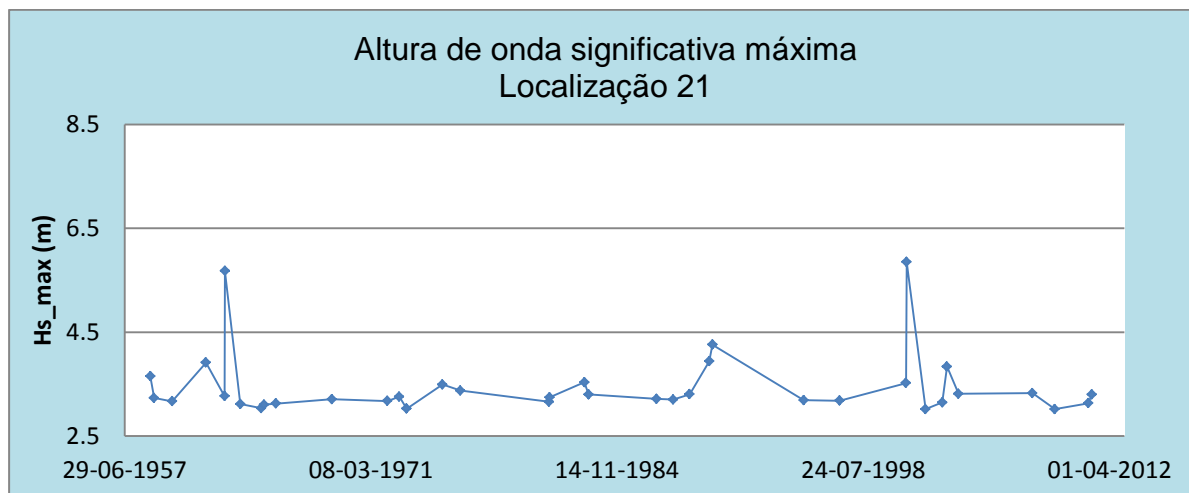


Figura I.10 – Apresentação da altura de onda significativa para a localização 21

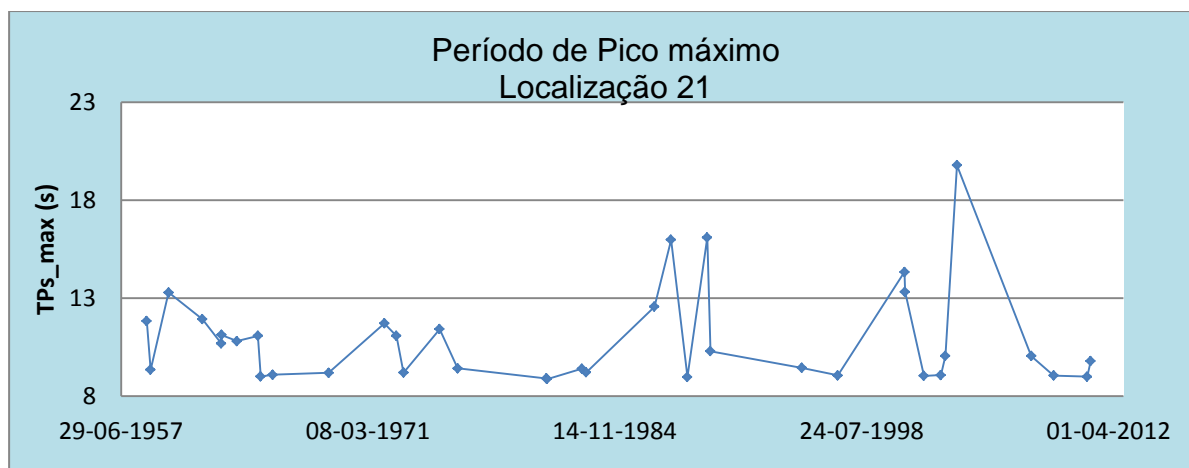


Figura I.11 – Apresentação do período de pico para a localização 21

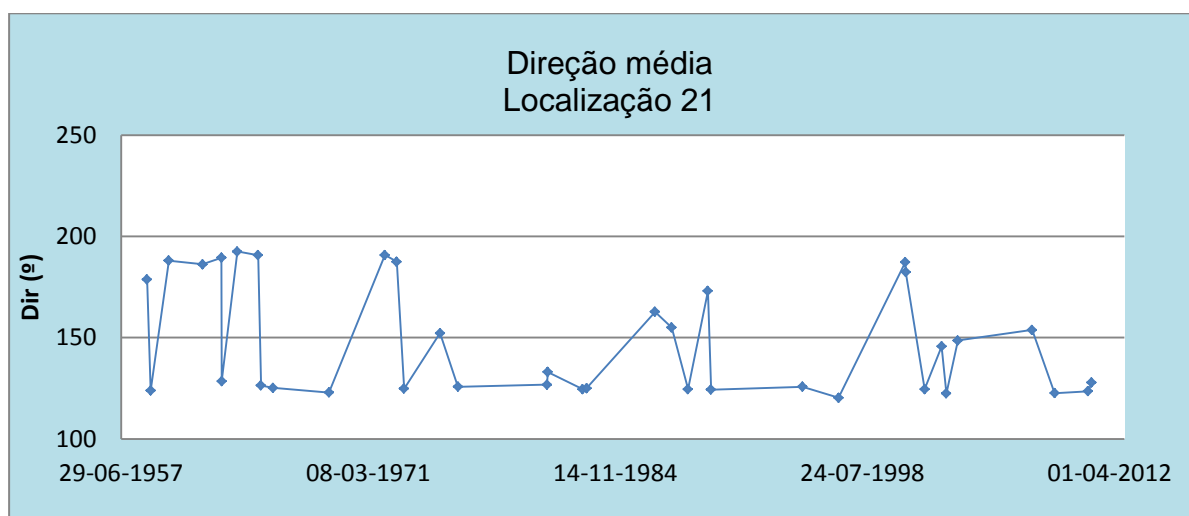


Figura I.12 – Apresentação da direção média para a localização 21